

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO MECÁNICO

**TEMA:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ABLANDADOR DE AGUA
MEDIANTE EL EMPLEO DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO PARA
ABASTECER LOS EQUIPOS TÉRMICOS DEL LABORATORIO DE
TERMODINÁMICA.**

**AUTOR:
LUIS ALFREDO CERVANTES ANANGONÓ**

**DIRECTOR:
LUIS ANIBAL ANDRANGO A**

Quito, abril de 2015

CERTIFICACIÓN

Certifico que la presente tesis ha sido elaborada y desarrollada en su totalidad por el señor Luis Alfredo Cervantes Anangonó.

(f) _____

Ing. Luis Andrango

**DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO
DEL TRABAJO DE GRADO.**

Yo Luis Alfredo Cervantes Anangón autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Luis Alfredo Cervantes Anangón
CI: 1713264388

DEDICATORIA

A toda mi familia y amigos que siempre estuvieron presentes durante mi proceso educativo y pusieron su grano de arena o contribuyeron de alguna manera para ayudarme a cumplir con esta meta.

En especial a mi Madre y a Monserrate por su amor y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

A los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana quienes con profesionalismo, vocación y mística imparten día a día sus conocimientos, experiencias y vivencias para formar; no ingenieros, sino personas con ingenio.

Al personal administrativo quienes más allá de cumplir con sus funciones, con mucho cariño y constancia me han alentado siempre a seguir adelante y culminar este ciclo de aprendizaje.

Mi agradecimiento especial hacia el Director de Escuela por la apertura que brinda a los estudiantes y al Tutor por su completa colaboración y compromiso con el proyecto.

ÍNDICE

| | |
|--|----------|
| CAPÍTULO 1..... | 3 |
| 1.1 Introducción | 3 |
| 1.2 Ablandamiento del agua..... | 4 |
| 1.3 Agua | 4 |
| 1.4 Sales minerales..... | 5 |
| 1.5 Ion | 6 |
| 1.6 Dureza | 7 |
| 1.6.1 Método 1 ppm como ion o mg/l..... | 7 |
| 1.6.2 Método 2 equivalencia por millón (epm)..... | 8 |
| 1.6.3 Método 3 partes por millos de CaCo ₃ (ppm)..... | 8 |
| 1.6.4 Método 4 granos/galón de CaCo ₃ | 8 |
| 1.7 Incrustaciones..... | 10 |
| 1.8 Potencial de hidrógeno (pH) | 11 |
| 1.9 Alcalinidad | 12 |
| 1.10 Intercambio iónico | 12 |
| 1.11 Total de sólidos disueltos (TDS)..... | 13 |
| 1.12 Ablandador de agua..... | 13 |
| 1.13 Tipos de ablandadores..... | 14 |
| 1.13.1 Ablandadores catalíticos | 14 |
| 1.13.2 Ablandadores mecánicos..... | 15 |
| 1.13.3 Ablandadores químicos | 16 |
| 1.14 Ablandadores de agua de tipo iónico. | 17 |
| 1.15 Partes principales | 18 |
| 1.15.1 Tanque de intercambio | 19 |
| 1.15.2 Distribuidores y colectores..... | 20 |
| 1.15.3 Tipo cabecera lateral. | 21 |
| 1.15.3.1 Tipo Radial..... | 23 |
| 1.15.3.2 Tuberías y válvulas | 24 |
| 1.15.4 Tanque de sal muera..... | 25 |
| 1.15.5 Inyector tipo venturi..... | 26 |
| 1.16 Resinas de intercambio iónico | 27 |
| 1.17 Tipos de resinas..... | 27 |

| | |
|--|-----------|
| 1.17.1 Resinas inorgánicas | 28 |
| 1.17.2 Resinas orgánicas | 28 |
| 1.17.2.1 Naturales | 28 |
| 1.17.2.2 Sintéticas | 29 |
| 1.18 Tipos de resinas de intercambio iónico según el grupo funcional | 29 |
| 1.18.1 Resinas catiónicas de ácido fuerte..... | 29 |
| 1.18.2 Resinas catiónicas de ácidos débiles | 30 |
| 1.18.3 Resinas aniónicas de bases fuertes | 30 |
| 1.18.4 Resinas aniónicas de base débil | 31 |
| 1.19 Estructura física y química de las resinas | 31 |
| 1.19.1 Formación grano de la resina | 32 |
| 1.19.2 Objetivos específicos logrados con un tamaño de partícula de 20 a 50 mallas. | 33 |
| 1.20 Reacciones con resinas de intercambio iónico..... | 33 |
| 1.21 Parámetros para la selección de un desmineralizador..... | 34 |
| 1.22 Ciclos de funcionamiento del ablandador de agua..... | 35 |
| 1.22.1 Ciclo de servicio o ablandamiento | 35 |
| 1.22.2 Ciclo de retrolavado | 37 |
| 1.22.3 Ciclo de Regeneración | 40 |
| 1.22.4 Ciclo de enjuague..... | 41 |
| 1.23 Conclusiones capítulo 1 | 42 |
| CAPÍTULO 2..... | 43 |
| 2.1 Introducción | 43 |
| 2.2 Selección del tipo de ablandador..... | 44 |
| 2.3 Parámetros de diseño..... | 44 |
| 2.3.1 Altura mínima del lecho de resina (h)..... | 45 |
| 2.3.2 Altura de pared lateral mínima (H) | 45 |
| 2.3.3 Velocidad lineal | 46 |
| 2.3.4 Velocidad espacial | 46 |
| 2.4 Variables fundamentales | 46 |
| 2.4.1 Concentración total de sólidos disueltos | 47 |
| 2.4.2 Características del agua a tratar..... | 47 |
| 2.4.3 Agua blanda requerida | 48 |
| 2.4.4 Volumen de resina..... | 50 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.5 Selección de resina | 50 |
| 2.4.6 Producción de agua desmineralizada entre regeneraciones | 51 |
| 2.5 Capacidad de trabajo (Cap) | 51 |
| 2.6 Dimensionamiento del lecho de resina | 51 |
| 2.7 Dimensionamiento del tanque de intercambio | 54 |
| 2.8 Cálculo de la cantidad de regenerante..... | 55 |
| 2.8.1 Tiempo de contacto | 55 |
| 2.9 Condiciones para el retrolavado..... | 56 |
| 2.10 Condiciones para el enjuague..... | 57 |
| 2.11 Cálculo del diámetro variando las consideraciones iniciales | 57 |
| 2.12 Análisis..... | 61 |
| 2.13 Selección de tuberías..... | 62 |
| 2.13.1 Criterios de diseño..... | 62 |
| 2.13.2 Criterio de selección considerado para las tuberías del ablandador..... | 63 |
| 2.13.2.1 Tubería PVC de ½” | 63 |
| 2.14 Selección de válvulas y accesorios | 64 |
| 2.14.1 Válvulas de bola compactas | 64 |
| 2.14.2 Accesorios de polipropileno (PP)..... | 65 |
| 2.14.3 Accesorios pagables de PVCP | 66 |
| 2.14.4 Válvula de compuerta 200 wog..... | 66 |
| 2.14.5 Manómetros de presión | 67 |
| 2.15 Conclusiones capítulo 2 | 68 |
| CAPÍTULO 3..... | 69 |
| 3.1 Introducción | 69 |
| 3.2 Instalación y toma de lecturas | 69 |
| 3.3 Caída de presión..... | 70 |
| 3.4 Nivel de dureza obtenida..... | 71 |
| 3.5 Frecuencia de regeneración..... | 72 |
| 3.6 Diagrama de flujo del proceso de construcción | 73 |
| 3.7 Fotografía del ablandador terminado | 75 |
| CAPÍTULO 4..... | 76 |
| 4.1 Costos directos | 76 |
| 4.2 Costos indirectos | 77 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Estructura molecular del agua | 4 |
| Figura 1.2 Ciclo hidrológico | 5 |
| Figura 1.3 Acumulación de incrustaciones en una caldera | 10 |
| Figura 1.4 Incrustaciones en una tubería de agua fría..... | 11 |
| Figura 1.5 Intercambio iónico en lecho fijo | 12 |
| Figura 1.6 Esquema de funcionamiento ablandador catalítico | 14 |
| Figura 1.7 Esquema de funcionamiento ablandador mecánico..... | 15 |
| Figura 1.8 Esquema de la reacción química en el ablandamiento | 17 |
| Figura 1.9 Esquema ablandador químico..... | 18 |
| Figura 1.10 Partes principales de un ablandador | 18 |
| Figura 1.11 Diagrama distribuidor de cabecera lateral | 21 |
| Figura 1.12 Diagrama distribuidor de cabecera lateral con llenado hacia abajo | 23 |
| Figura 1.13 Diagrama distribuidor radial..... | 24 |
| Figura 1.14 Tanque para depósito de salmuera..... | 25 |
| Figura 1.15 Inyector tipo Venturi..... | 26 |
| Figura 1.16 Detalle de las esferas de intercambio iónico..... | 27 |
| Figura 1.17 Parte superior resina catiónica, en la parte inferior aniónica..... | 31 |
| Figura 1.18 Ecuación balanceada..... | 34 |
| Figura 1.19 Proceso del ciclo de ablandamiento..... | 36 |
| Figura 1.20 Distribución de iones en el lecho durante el ablandamiento | 36 |
| Figura 1.21 Esquema de funcionamiento en ciclo de servicio..... | 37 |
| Figura 1.22 Esquema de funcionamiento en ciclo de retrolavado | 39 |
| Figura 1.23 Esquema de funcionamiento ciclo de regeneración..... | 41 |
| Figura 1.24 Esquema de funcionamiento en ciclo de enjuague | 42 |
| Figura 2.1 Longitudes que conforman la pared lateral mínima | 45 |
| Figura 2.2 Longitudes del lecho de resina | 53 |
| Figura 2.3 Longitudes que componen la altura del tanque | 54 |
| Figura 2.4 Válvula de bola SCH 80 | 65 |
| Figura 2.5 Accesorios en polipropileno | 65 |
| Figura 2.6 Accesorios PVCP | 66 |
| Figura 2.7 Válvula de compuerta | 67 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.8 Manómetro de presión | 67 |
| Figura 3.1 Datos obtenidos durante el proceso de ablandamiento..... | 70 |
| Figura 3.2 Comportamiento del diferencial de presión; caudal 2 gpm | 70 |
| Figura 3.3 Comportamiento de la dureza; caudal 2 gpm | 71 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1 Cationes y aniones típicamente presentes en el agua..... | 6 |
| Tabla 1.2 Clasificación de la dureza del agua según grados hidrométricos..... | 9 |
| Tabla 1.3 Clasificación de la dureza en mg/ CaCO ₃ | 9 |
| Tabla 2.1 Cuadro comparativo | 44 |
| Tabla 2.2 Minerales presentes en el agua..... | 47 |
| Tabla 2.3 Requerimiento de agua en los equipos..... | 49 |
| Tabla 2.4 Cálculo del diámetro de tanques considerando diferentes caudales y un volumen inicial de resina de 1ft ³ | 58 |
| Tabla 2.5 Cálculo del diámetro de tanques considerando diferentes caudales y diferentes volúmenes iniciales de resina | 59 |
| Tabla 2.6 Cálculo del diámetro de tanques considerando valores de caudal y volúmenes entre 0,1 y 2 | 60 |
| Tabla 2.7 Comparación de resultados | 61 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1 MANUAL DE OPERACIÓN | 82 |
| Anexo 2 MANUAL DE MANTENIMIENTO | 85 |
| Anexo 3 FICHA TÉCNICA RESINA | 87 |
| Anexo 4 NOMOGRAMA | 88 |
| Anexo 5 FOTOGRAFÍAS DE PARTES Y PROCESO CONSTRUCTIVO | 89 |
| Anexo 6 PLANOS..... | 90 |

RESUMEN

Los procesos de producción de vapor son usados en un sin número de aplicaciones industriales, estos utilizan como materia prima el agua, que puede ser captada de una infinidad de formas y lugares. Generalmente se le atribuye al agua el calificativo de sustancia pura; sin embargo debido al ciclo natural que cumple el agua dentro de la atmósfera ésta se contamina con muchos minerales. El calcio y el magnesio son los principales minerales causantes de contaminar el agua, este tipo de contaminación es conocida como dureza. La dureza del agua es la causante de que sistemas de generación de vapor, intercambiadores de calor, sistemas de bombeo de agua entre otros sufran daños y taponamiento de sus partes a causa de las calcificaciones que se incrustan y tapan las tuberías y partes internas de los sistemas antes mencionados.

Con el fin de preservar y alargar la vida útil de los equipos térmicos existentes en el laboratorio de termodinámica de una Universidad Politécnica Salesiana (UPS), se plantea como solución el diseño y construcción de un ablandador de agua de tipo iónico, dimensionado para abastecer a una caldera de 6 BHP y demás equipos existentes. El diseño comprende desde el estudio de las propiedades del agua, definición de conceptos básicos, análisis de la dureza el agua de abastecimiento, hasta la selección del ablandador tipo iónico, ciclos de funcionamiento, principios de diseño, selección de materiales, construcción y puesta a prueba del equipo.

ABSTRACT

The steam production processes are used in countless industrial applications; they use water as a raw material that can be captured in a myriad of ways and places. Is generally attributed to water the label of pure substance; However due to the natural cycle that meets the water in the atmosphere it is contaminated with many minerals. Calcium and magnesium are the main minerals that cause water pollution; this pollution is known as hardness. Water hardness that is causing steam generation systems, heat exchangers, water pumping systems including plugging damaged parts and because of calcifications that are embedded and plug pipes and internal parts of above systems.

In order to preserve and extend the life of existing thermal equipment in the laboratory of thermodynamics from a Salesian University, is proposed as solution design and construction of a water softener ion type, sized to supply a boiler 6 BHP and other existing equipment. The design ranges from the study of the properties of water, definition of basic concepts, and analysis hardness water supply to the selection of ionic softener, pieces of operation, and principles of design, material selection, construction and commissioning equipment testing.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un ablandador de agua tipo iónico que sustituya los iones de calcio y magnesio presentes en el agua, por iones de sodio y potasio para alimentar la caldera de vapor de 6 BHP, el intercambiador de calor y la bomba de calor del laboratorio de termodinámica de la universidad Politécnica Salesiana campus Kennedy con agua libre de dureza.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar y construir un ablandador de agua dimensionado y adaptado a la necesidad de suministro y usos específicos de la caldera de 6 BHP, y el intercambiador de calor, de fácil mantenimiento y bajos costes de operación.
2. Eliminar la dureza temporal del agua que va a ser usada en el caldero a niveles recomendados por “The American Water Works Association”
3. Analizar los ciclos de funcionamiento que requiere un ablandador de tipo iónico para su correcto funcionamiento.
4. Disminuir considerablemente el volumen de formación de calcificaciones en el interior de los tubos del caldero para alargar la vida útil y reducir costes de mantenimiento.

NOMENCLATURA UTILIZADA

| | |
|----------------|--|
| A | Área |
| A _i | Área ideal |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers |
| API | American Petroleum Institute |
| Bar | Unidad de presión |
| Cap | Capacidad de trabajo de la resina |
| d | Díámetro |
| D | Dureza |
| DVB | Divinilbenzeno |
| epm | Equivalencia por millón |
| fc | Factor de seguridad |
| ft | Pies |
| gal | Galón |
| gr | Grano |
| gpm | Galones por minuto |
| h | Altura mínima del lecho de resina |
| H | Altura de pared lateral mínima |
| hr | Horas |
| l | Litro |
| m | Metro |
| mg | Miligramo |
| min | Minutos |
| NTP | National Pipe Thread |
| P | Presión |
| pH | Potencial hidrógeno |
| plg | Pulgadas |
| PP | Polipropileno |
| PSI | Unidad de presión |
| PVC | Policloruro de Vinilo |
| PVCP | Policloruro de vinilo pegable |
| Q | Caudal |
| SHC | Norma para diámetro de tubos según espesor |

| | |
|-------|------------------------------------|
| t_c | Tiempo de contacto |
| TDS | Total de sólidos disueltos |
| v_c | Volumen del cilindro |
| v_e | Velocidad espacial |
| v_l | Velocidad lineal |
| VR | Volumen de resina |
| Wog | Especificación de tipos de fluidos |

INTRODUCCIÓN

En el laboratorio de termodinámica de la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Kennedy, existe una caldera de vapor, con una potencia de 6 boiler horsepower (BHP) , la cual pierde poco a poco su eficiencia debido a formación y acumulación de calcificaciones en su interior causadas por la cristalización de partículas de minerales como son el calcio y magnesio presentes en el agua; esto produce un taponamiento y deterioro prematuro de las tuberías y partes internas a la vez que la transferencia de calor hacia el agua disminuye, ocasionando pérdidas de energía lo cual se verá reflejado en el futuro en el incremento de costos de operación y mantenimiento.

Existen en el mercado varios tipos de desmineralizadores capaces de eliminar las partículas de calcio y de magnesio del agua, este proceso se conoce como eliminación de la dureza; por lo general estos equipos son dimensionados en función de la potencia de la caldera y demás equipos a ser alimentados; desafortunadamente en el mercado nacional no es posible adquirir un ablandador de agua dimensionado para una caldera de 6 BHP; incluso el equipo casero de menor capacidad que se podría adquirir, estaría sobre dimensionado en función de la cantidad de flujo requerido.

Una solución viable es diseñar y construir un ablandador de agua mediante el empleo de resinas de intercambio iónico, de bajo coste de operación y fácil mantenimiento, para abastecer los equipos térmicos del laboratorio de termodinámica. Este ablandador será capaz de eliminar la dureza temporal del agua que va a ser usada en el caldero a niveles recomendados por “The American Water Works Associations”.

Con el ablandador se podrá disminuir considerablemente el volumen de formación de calcificaciones en el interior de los tubos del caldero de esta forma se lograría alargar la vida útil y reducir costes de mantenimiento. El equipo logrará reducir la dureza a un máximo de 2 granos / galón y será diseñado para condiciones de uso específicas, en función del resultado del análisis de la dureza del agua, la potencia de la caldera de vapor y consumo de equipos térmicos.

El diseño incluirá el análisis de caudal, velocidad lineal, velocidad espacial, flujo regenerante, efecto Venturi, selección de materiales y se desarrollaran planos de conjunto, constructivos, manuales de operación y de mantenimiento.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTO TEÓRICO DEL ABLANDADOR DE AGUA

1.1 Introducción

Muchos procesos industriales requieren de producción de vapor el cual se obtiene mediante el uso de calderas; el agua de alimentación es captada de una infinidad de lugares como son: ríos, pozos subterráneos, vertientes, canales, piscinas de recolección de aguas lluvias o de la red de agua potable; estas aguas en mayor o menor cantidad se encuentran contaminadas con minerales, principalmente por calcio y magnesio. Estos dos elementos son los principales causantes de las incrustaciones presentes tanto en las tuberías como en los equipos de generación y utilización de vapor.

Se expondrá fundamentos básicos sobre el proceso de ablandamiento de agua mediante la utilización de resinas de intercambio iónico, se definirán conceptos relacionados con procesos, técnicas, equipos, métodos, elementos e insumos relacionados con la desmineralización de agua; enfocados particularmente a la eliminación de la dureza; (partículas de calcio y de magnesio)

Se realizará una breve descripción sobre los tipos de ablandadores existentes, su principio de funcionamiento, las características principales y sus aplicaciones. Se enfocará el análisis a los ablandadores de tipo iónico y se estudiará su principio de funcionamiento, los ciclos de trabajo y sus componentes principales.

También se definirá el concepto de resinas de intercambio iónico, la clasificación general, la clasificación según su grupo funcional, se realizará una breve descripción de la estructura física y de las reacciones químicas que se producen durante el intercambio de iones.

1.2 Ablandamiento del agua

El ablandamiento del agua es una técnica o proceso químico que sirve para eliminar los iones principalmente de Calcio y de Magnesio; en algunos casos también iones de hierro mediante sustitución.

1.3 Agua

Su fórmula molecular es H_2O , es el elemento de mayor abundancia en la naturaleza y en el cuerpo humano; se compone de dos moléculas de hidrógeno y una molécula de oxígeno, la geometría de sus enlaces la convierte en una molécula muy estable como se aprecia a continuación.

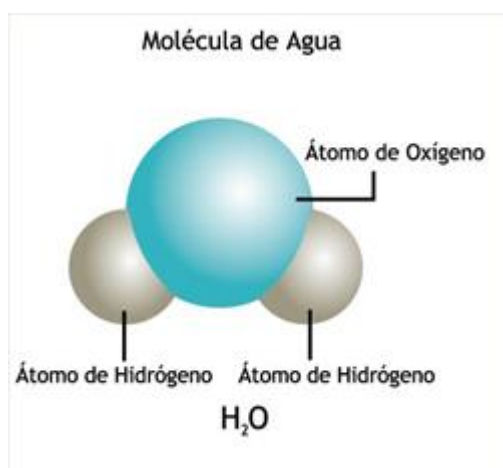


Figura 1.1 Estructura molecular del agua

Fuente: EducarChile, 2013

Debido a sus características especiales: incolora, insabora e insípida, muchas personas tienden a pensar que es un elemento totalmente puro lo cual no es precisamente cierto. En la naturaleza, el agua está presente en los tres estados de la materia, esto se produce debido a cambios térmicos que dentro de la atmosfera, originan un ciclo hidrológico.

Cuando se produce la precipitación del agua que se encuentra condensada ésta empieza a contaminarse con las partículas sólidas presentes en el aire y al contacto

con la superficie terrestre es contaminada por sales que se disuelven en ella. Este fenómeno natural se explica en la figura 1.2.

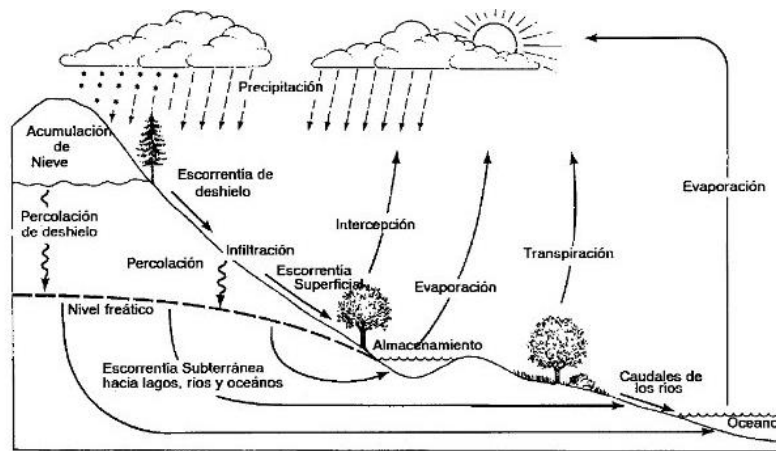


Figura 1.2 Ciclo hidrológico
Fuente: Rojas, Civilgeeks, 2010

De esta forma el agua adquiere varios contaminantes, entre ellos sales minerales como el calcio, carbonatos de magnesio, sulfatos y cloruros.

1.4 Sales minerales

Son moléculas inorgánicas de fácil ionización en contacto con el agua y se encuentran en la naturaleza, aunque también es posible hallarlas dentro de los seres vivos. Cuando las sales se disuelven en el agua, revelan la presencia de cargas positivas o negativas; es decir se evidencia la presencia de cationes y aniones.

Existen varias formas de clasificar las sales, según su constitución presentan diferentes tendencias por lo que se puede distinguir dos grandes grupos cuando se encuentran disueltas:

Grupo A) sales INCRUSTANTES, constituidas por:

- Bicarbonato Cálcico,.....Ca (CO₃H)₂
- Bicarbonato Magnésico,.....Mg (CO₃H)₂
- Sulfato Cálcico,.....CaSO₄
- Sulfato Magnésico,.....MgSO₄
- Cloruro Cálcico,.....CaCL₂

Grupo B) Sales NO INCRUSTANTES, constituidas por:

Carbonato Sódico,..... Na_2CO_3

Sulfato Sódico,..... Na_2SO_4

Cloruro Sódico,..... NaCl

Como puede observarse, todas las sales incrustantes contienen CALCIO y MAGNESIO y el contenido total de los mismos constituye la denominada DUREZA TOTAL (Blanco, 1994, p. 3,4)

1.5 Ion

Es una partícula cargada eléctricamente que se forma cuando un átomo neutro o en equilibrio, gana o pierde uno o más electrones. Este proceso se denomina ionización; cuando los átomos pierden electrones se cargan positivamente y se denominan cationes, y cuando los átomos ganan uno o más electrones se cargan negativamente se denominan aniones.

El intercambio iónico es cuando un ion se cambia o se sustituye por otro; sin embargo se debe tener claro que esto solo es posible cuando un ion está unido a un sólido insoluble y el otro está en la solución de agua. Este intercambio de iones solo puede darse con iones de la misma carga; a continuación se indica los cationes y aniones más comunes presentes en el agua:

| <i>Major</i> | |
|--|----------------------------------|
| <i>Cations</i> | <i>Anions</i> |
| Calcium (Ca^{2+}) | Bicarbonate (HCO_3^-) |
| Magnesium (Mg^{2+}) | Sulfate (SO_4^{2-}) |
| Sodium (Na^+) | Chlorides (Cl^-) |
| Silica ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) | |
| <small>*Silica is present in many forms, as a very weak acid or polymers. More details will be given in later discussions.</small> | |
| <i>Minor</i> | |
| <i>Cations</i> | <i>Anions</i> |
| Potassium (K^+) | Carbonate (CO_3^{2-}) |
| Barium (Ba^{2+}) | Nitrate (NO_3^-) |
| Iron (Fe^{2+} or Fe^{3+}) | Phosphate (PO_4^{3-}) |
| Manganese (Mn^{2+} or Mn^{3+}) | Sulfide (S^{2-}) |
| Aluminum (Al^{3+}) | Fluoride (F^-) |
| Ammonium (NH_4^+) | Carbon dioxide (CO_2) |
| Strontium (Sr^{2+}) | |
| <small>*Carbon dioxide dissolves in water to become the weak acid, carbonic acid. More details later.</small> | |

Tabla 1.1 Cationes y aniones típicamente presentes en el agua

Fuente: Owens, 1995, p. 6

1.6 Dureza

Se denomina agua dura a aquella que contiene un alto nivel de minerales, en particular sales de magnesio y calcio. Dependiendo con que elementos estén ligados el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^{2+}), se habla de dos tipos de dureza:

- Dureza temporal.- Está formada por bicarbonatos de calcio y de magnesio que desaparecen por ebullición del agua.
- Dureza permanente.- Está formada por sulfatos y cloruros de calcio y magnesio.

La dureza presente en el agua puede ser medida en granos por galón (gr / gal) o ppm de CaCO_3 partes por millón de carbonato de calcio; por lo general la dureza se expresa como el número equivalente de miligramos de carbonato de calcio (CaCO_3) por litro es decir, si la concentración total de Ca^{2+} y Mg^{2+} es 1 mM, se dice que la dureza es 100 mg l^{-1} de CaCO_3 ($= 1 \text{ mM de CaCO}_3$).

Los valores de la dureza pueden ser expresados en varias unidades o métodos:

1.6.1 Método 1 ppm como ion o mg/l

Ppm (partes por millón) o mg/l (miligramo sobre litro) son términos intercambiables, el aspecto interesante de presentar un análisis en ppm o mg/l es que se tiene el peso real para cada ion en un millón de partes de agua. El peso molecular del sodio es diferente al del calcio por lo cual se debe encontrar una forma de hacerlos equivalentes, esto se logra dividiendo el peso del ion para su carga. (Owens, 1995, p.12)

$$\text{Peso Equivalente} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{valencia}} \quad (1.1)$$

1.6.2 Método 2 equivalencia por millón (epm)

Es otra forma de expresar la dureza, para obtener el equivalente por millón a partir del análisis del agua expresada en ppm de iones es necesario dividir la unidad de peso (ppm como ion) de cada sustancia por el peso equivalente: (Owens, 1995, p.12)

$$epm = \frac{ppm \text{ de ion}}{\text{Peso equivalente}} \quad (1.2)$$

1.6.3 Método 3 partes por millos de CaCO₃ (ppm)

Esta manera de expresar el análisis del agua es la más utilizada en cálculos para determinar la capacidad de los iones; CaCO₃ es una combinación de (Ca²⁺) y (Mg²⁺), el peso equivalente se obtiene dividiendo el peso molecular 100.08/2 = 50.04, su fórmula es”: (Owens, 1995, p.13)

$$ppm \text{ de } CaCO_3 = ppm \text{ de ion} \cdot \frac{50}{\text{Peso equivalente del ion}} \quad (1.3)$$

1.6.4 Método 4 granos/galón de CaCO₃

Es conveniente tener los valores de dureza en esta unidad para poder realizar el cálculo de las capacidades de la resina debido a que este último dato por lo general se obtiene del fabricante y lo expresan en unidades inglesas (grain/gal) lo cual indica el número de galones de agua que puede ser tratado por un pie cubico (ft³) de resina.

Para convertir ppm de CaCO₃ a granos/gal de CaCO₃ se usa un factor el cual se obtiene de la siguiente relación:

1 grano de CaCO₃ = 1/7000 granos/libra = 0.0001428 libras

1 galón pesa 8.33 libras entonces:

$$1 \frac{\text{grano}}{\text{galon}} = \frac{0.0001428 \cdot 1000000}{8.33} = 17.1 \text{ de } CaCO_3$$

A veces se indica como límite para clasificar una muestra de agua como dura, el valor de 120 mg de CaCO_3 / l; valores iguales o superiores al indicado califican la muestra de agua como dura.

Existen grados de dureza del agua americanos, franceses, alemanes e ingleses que a continuación se mencionan con sus equivalencias en mg CaCO_3 /l de agua:

- Grado americano ($^{\circ}\text{a}$): Equivale a 17,2 mg CaCO_3 /l de agua.
- Grado francés ($^{\circ}\text{f}$): Equivale a 10,0 mg CaCO_3 /l de agua.
- Grado alemán (Deutsche Härte, $^{\circ}\text{dH}$): Equivale a 17,9 mg CaCO_3 /l de agua.
- Grado inglés ($^{\circ}\text{e}$) o grado Clark: Equivale a 14,3 mg CaCO_3 /l de agua.

La clasificación de la dureza del agua según los diferentes grados hidrotimétricos y su equivalencia en mg CaCO_3 /l de agua: Grado americano ($^{\circ}\text{a}$), Grado francés ($^{\circ}\text{f}$), Grado alemán (Deutsche Härte, $^{\circ}\text{dH}$) y Grado inglés ($^{\circ}\text{e}$) o grado Clark; se pueden apreciar en la siguiente tabla.

| Tipos de agua | $^{\circ}\text{a}$ | $^{\circ}\text{f}$ | $^{\circ}\text{dH}$ | $^{\circ}\text{e}$ |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Agua blanda | ≤ 17 | ≤ 1.7 | ≤ 0.95 | ≤ 1.19 |
| Agua levemente dura | ≤ 60 | ≤ 6.0 | ≤ 3.35 | ≤ 4.20 |
| Agua moderadamente dura | ≤ 120 | ≤ 12.0 | ≤ 6.70 | ≤ 8.39 |
| Agua dura | ≤ 180 | ≤ 18.0 | ≤ 10.05 | ≤ 12.59 |
| Agua muy dura | > 180 | > 18.0 | > 10.05 | > 12.59 |

Tabla 1.2 Clasificación de la dureza del agua según grados hidrométricos
Fuente: Rodríguez, 2010, p.15

| Dureza (mg/l CaCO_3) | Tipos de agua |
|---|----------------------|
| 0 – 75 | Agua blanda |
| 75 – 150 | Agua semi-dura |
| 150 – 300 | Agua dura |
| más de 300 | Agua muy dura |

Tabla 1.3 Clasificación de la dureza en mg/ CaCO_3
Fuente: Rodríguez, 2010, p.15

1.7 Incrustaciones

Las incrustaciones son un problema grave que se origina a causa de la dureza del agua, ya que existe una tendencia para la precipitación de las sales cálcicas y magnésicas; la razón se debe a que el calcio y el magnesio normalmente se encuentran en el agua en forma de bicarbonatos los cuales en presencia de calor se convierten en carbonatos insolubles.

Las incrustaciones, además de obstaculizar el paso del agua en las tuberías, reducen considerablemente la eficiencia energética de los calderos e intercambiadores de calor lo cual es muy grave debido a que la baja conductividad térmica de las incrustaciones actúa como aislante térmico, provocando problemas de refrigeración en las superficies metálicas y puede llegar a causar daños por sobrecalentamiento.

Por otro lado la reducción de la eficiencia térmica de un caldero repercute directamente sobre los costos de producción de la industria debido a las incrustaciones existentes, porque para tratar de compensar esa pérdida de calor en muchos casos se eleva el consumo de combustible lo cual se traduce en dinero, es decir, en un mismo tiempo t , se quema más combustible para obtener un Q deseado; a continuación se puede visualizar incrustaciones al interior de una caldera.



Figura 1.3 Acumulación de incrustaciones en una caldera

Fuente: Behn, p.1

Las incrustaciones también se forman en el agua fría debido a la influencia de otros factores como el pH, gas carbónico disuelto y combinado, como se puede apreciar en la figura 1.4.



Figura 1.4 Incrustaciones en una tubería de agua fría
Fuente: Higia, 2015

1.8 Potencial de hidrógeno (pH)

Es una medida de concentración de iones de hidrógeno (H^+) en el agua; dicho de otra manera, es un sistema numérico que se refiere a la acidez, la neutralidad o basicidad (alcalinidad) de un agua, con los números de 0 (más ácido) a 7 (neutro) a 14 (más básico).

El agua pura (sin otras sustancias ionizadas o contaminantes) tiene una concentración de iones hidrógeno de 0,0000001 gramos de iones de hidrógeno en cada litro de agua a 25 °C. Este número se puede expresar como 1×10^{-7} , o en la escala de pH como 7 o neutro. Cada unidad de pH por debajo de 7, tales como 6, representa un aumento de diez veces en la concentración de iones hidrógeno de la unidad por encima de ella. Lo contrario también es cierto. Cada unidad de pH por encima de 7 es una disminución de diez veces en la concentración de iones hidrógeno de la de la unidad anterior. (Owens, 1995, p. 16)

1.9 Alcalinidad

La alcalinidad del agua se determina por la cantidad de bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) o hidrato (hidroxilo OH^-) presentes en el agua. La mayoría de las aguas crudas contienen sólo alcalinidad de bicarbonato, mientras que las aguas tratadas pueden contener bicarbonato, carbonato o carbonato y alcalinidad hidrato.

1.10 Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido; esto implica la transferencia de uno o más iones que se encuentran en una solución hacia un sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga los cuales se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales.

Es importante recalcar que si ambos iones se encuentran en una solución de agua, no existiría intercambio iónico debido a que los dos tendrían libertad para moverse en la solución y así nada sería movido o reemplazado. La sustitución solo puede darse cuando un ion está unido a un sólido insoluble y el otro está en la solución; esta acción es representada en la figura 1.5.

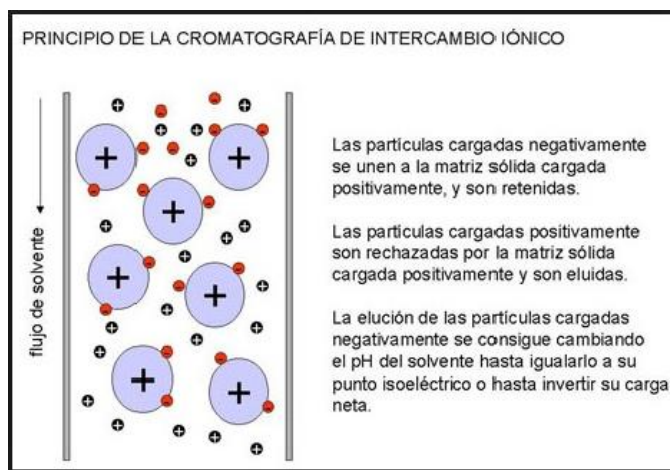


Figura 1.5 Intercambio iónico en lecho fijo

Fuente: Javeriana, 2006

En la década de 1850 se reportaron los primeros estudios sobre intercambio iónico, El trabajo de Thompson y Way (1950) demostró que cuando los suelos se trataron con sulfato de amonio o carbonato de amonio, la mayor parte del ion amonio (NH_4) fue absorbido y de iones de calcio (Ca^{2+}) fueron liberados.

1.11 Total de sólidos disueltos (TDS)

En este caso la palabra sólido hace referencia a la materia suspendida o disuelta en un medio acuoso. El contenido total de sólidos es una de las características físicas más importantes del agua; esta incluye la materia en suspensión y la materia disuelta.

La determinación de sólidos disueltos totales mide específicamente el total de residuos sólidos filtrables (sales y residuos orgánicos) o sea es una medida de las sustancias orgánicas e inorgánicas en forma molecular ionizada o micro granular que contienen los líquidos; para que sean considerados (TDS) las sustancias deben ser lo suficientemente pequeñas como para ser filtradas por una criba de dos micras.

Los sólidos disueltos están directamente relacionados con la calidad de un cuerpo de agua; por ejemplo las aguas para consumo humano, con alto contenido de sólidos disueltos, generalmente no son agradables al paladar inclusive pueden llegar a ser tóxicas. En la industria de la ósmosis inversa se define como la suma total de los cationes y aniones en partes por millón (ppm).

1.12 Ablandador de agua

El ablandador de agua es una unidad diseñada para eliminar los iones de calcio y magnesio de un volumen determinado, en un tiempo definido; es un equipo que por medios mecánicos, químicos y/o electrónicos trata el agua para reducir el contenido de sales minerales y sus incrustaciones en tuberías y depósitos de agua.

1.13 Tipos de ablandadores

Existen diversos tipos de ablandadores así como varias maneras de clasificarlos, en este caso según el tipo de procesos que realizan para la eliminación de las sales minerales; se los puede clasificar en catalíticos, químicos, mecánicos y eléctricos.

1.13.1 Ablandadores catalíticos

Son dispositivos de tratamiento de aguas, diseñados para evitar la formación de incrustaciones calcáreas (sarro); se compone de un tubo de acero inoxidable con un núcleo de aleación especial en su interior, el principio de funcionamiento consiste en generar turbulencias y cambios de presión en el agua, esto hace que se precipite el carbonato de calcio por una modificación en el pH del agua, haciendo que los cristales de calcio disminuyan su tamaño sin la posibilidad de precipitarse y por ende no forman sarro ni incrustaciones, el equipo actúa como un catalizador.

De esta forma, los "coloides" formados no tienen posibilidad de depositarse y formar incrustaciones ni de aglutinarse entre ellos por lo que son arrastrados por el flujo de agua pasando inofensivamente por equipos y cañerías, teniendo el efecto secundario de desincrustar los depósitos de sarro ya formados; en la siguiente figura se muestra el principio de funcionamiento.

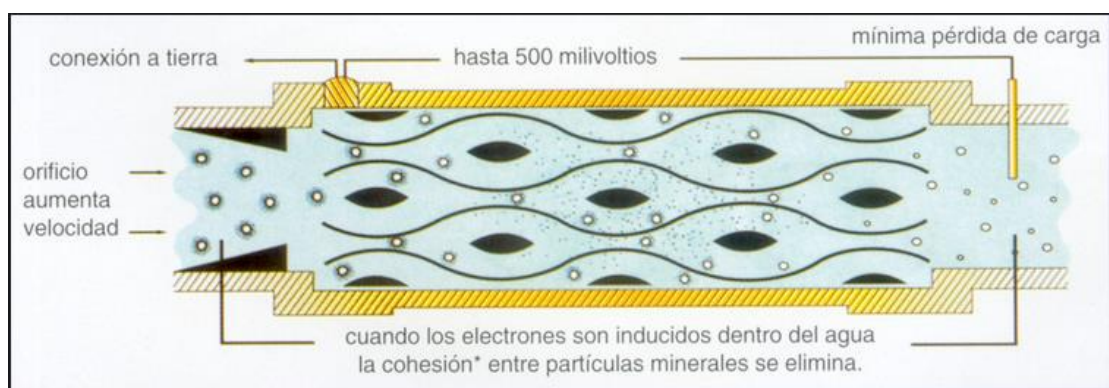


Figura 1.6 Esquema de funcionamiento ablandador catalítico
Fuente: Tratamiento natural del agua, 2011

Entre las principales ventajas de este tipo de ablandador se puede mencionar las siguientes:

- Son de tamaños reducidos
- Fácil instalación
- No necesitan mantenimiento
- No tiene elementos intercambiables

Sin embargo, el mecanismo de acción descrito es causa de controversia, pues el proceso de acción no es claro desde el punto de vista químico y por tanto existen detractores que lo señalan como un producto fraudulento.

1.13.2 Ablandadores mecánicos

Son aquellos utilizados en procesos de ósmosis inversa, su principio de funcionamiento consiste en aplicar presión y utilizar una membrana semipermeable, el agua pura atraviesa la membrana y deja atrás todas las partículas minerales e impurezas; el proceso se ilustra en la figura 1.7.

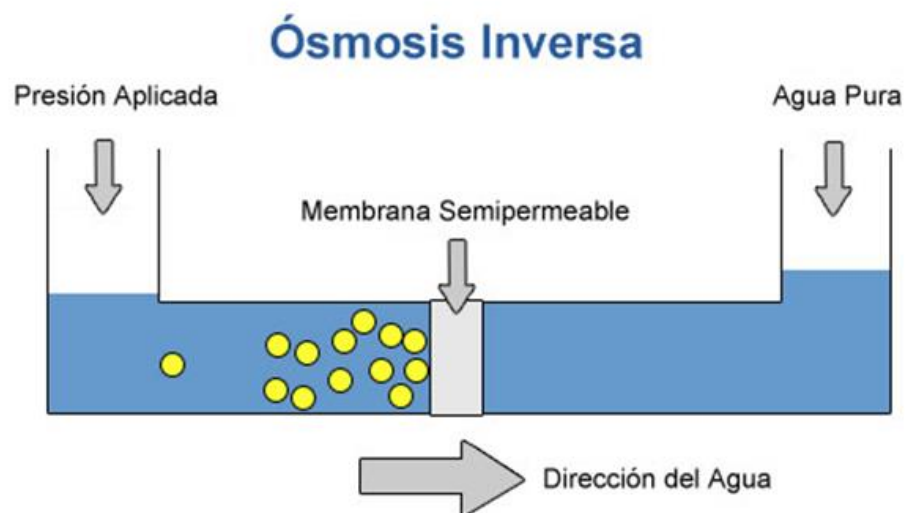


Figura 1.7 Esquema de funcionamiento ablandador mecánico
Fuente: Agua Bona, 2014

Por lo general estos equipos son diseñados para tratar agua destinada al consumo humano, tienen una baja capacidad de producción y las membranas requieren ser limpiadas con frecuencia lo cual los hace poco prácticos para determinadas aplicaciones.

El proceso de ósmosis inversa tiene varias aplicaciones, entre las principales se puede mencionar las siguientes:

- a) Se calcula que el 50% de las plantas de ósmosis inversa se emplean para la desalinización de agua de mar y agua salobre. Para conseguir condiciones de potabilidad se utilizan membranas de poliamida de tipo fibra hueca que permiten conseguir coeficientes de rechazo superiores al 99,3% con presiones de trabajo de 50 bar – 70 bar.
- b) Otra aplicación importante es la obtención de agua ultra pura la cual es demandada por las industrias electrónica, farmacéutica y de producción de energía.
- c) Se calcula que solo un 10% de las plantas de ósmosis inversa se emplean como sistemas de descontaminación de aguas urbanas e industriales.

1.13.3 Ablandadores químicos

Este tipo de ablandadores están compuestos de un lecho de zeolita (un compuesto químico de sales de sodio o potasio) por el cual se hace circular el agua a ser tratada. Los iones de calcio y magnesio son reemplazados por iones de sodio, el potasio o sodio liberado no se adhiere a las paredes de las tuberías ni reacciona con el jabón; solucionando ambos problemas.

Después de un tiempo el sodio es reemplazado completamente por calcio o magnesio y deja de suavizar el agua. En este momento es necesario reemplazar el cartucho o las pastillas de zeolita por unas nuevas.

Existen equipos que permiten hacer una regeneración química de la zeolita; en la figura 1.8 se ilustra el funcionamiento de un ablandador tipo químico.

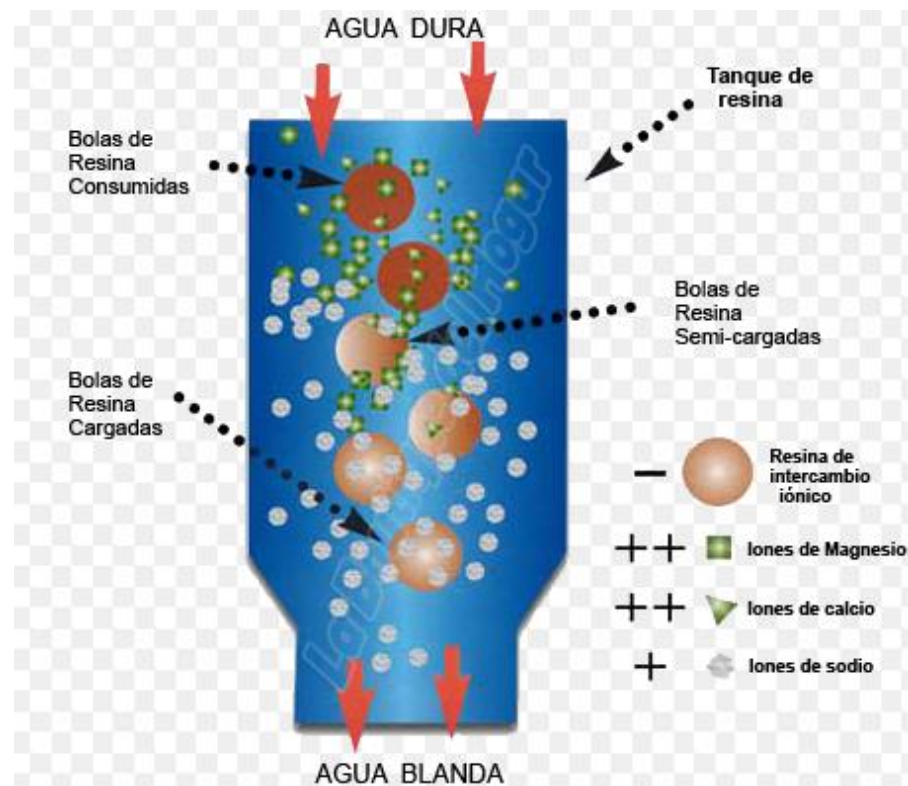


Figura 1.8 Esquema de la reacción química en el ablandamiento
Fuente: Descalcificadores Navarra, 2014

1.14 Ablandadores de agua de tipo iónico.

Son ablandadores que utilizan resinas de intercambio iónico para realizar el proceso; pertenecen al grupo de los ablandadores químicos. Por lo general se componen de tres elementos principales:

- Estanque de resina
- Válvulas de control
- Estanque de salmuera.

En el estanque de resina es donde se produce el “ablandamiento” del agua, al producirse un intercambio iónico entre el agua “dura”, rica en calcio y magnesio y la

resina, rica en sodio. Cuando esto ocurre la resina retiene el calcio y magnesio y el agua se lleva el sodio, la figura que se presenta a continuación muestra el esquema general de partes.



Figura 1.9 Esquema ablandador químico
Fuente: Anthony, 2009

1.15 Partes principales

Los ablandadores de agua, pueden albergar varios componentes o partes según su diseño, sin embargo debido a su importancia se puede reconocer como principales los siguientes:

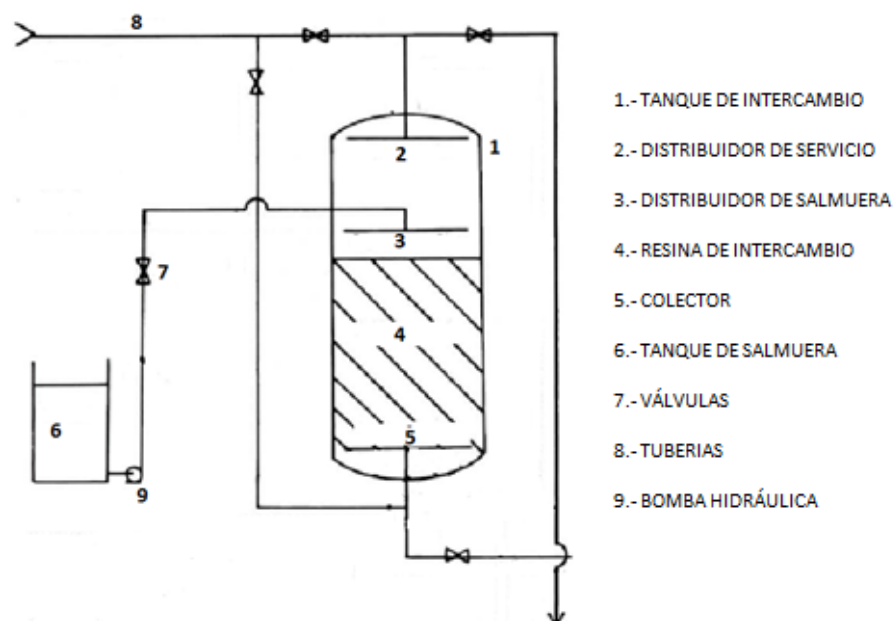


Figura 1.10 Partes principales de un ablandador

1.15.1 Tanque de intercambio

El tanque de intercambio, es considerado por muchos como la parte más importante o principal de los sistemas de ablandamiento, es el espacio que alberga a la resina y donde se produce el intercambio iónico. Existen en varias formas: rectangulares, cónicos, esféricos sin embargo la geometría más utilizada para su construcción es la cilíndrica.

En equipos de uso industrial, por tratarse de recipientes que van a trabajar a altas presiones, su construcción deberá basarse en las normas del American Petroleum Institute (API) o American Society of Mechanical Engineers (ASME). El factor determinante que va a garantizar un diseño óptimo y un trabajo eficiente de un ablandador es: su correcto dimensionamiento.

Existen seis “**Variables fundamentales**” que se deben considerar para el adecuado dimensionamiento del tanque de intercambio:

- 1) Concentración de sólidos totales disueltos
- 2) Características del agua a tratar
- 3) Flujo de alimentación
- 4) Volumen de resina
- 5) Selección de resina
- 6) Producción de agua desmineralizada entre regeneraciones

La mayoría de los sistemas de intercambio iónico industriales utilizan recipientes a presión que por lo general son cilíndricos verticales contruidos en acero; sin embargo existen varios materiales que también son usados en la fabricación de los recipientes, estos pueden ser acero inoxidable, fibra de vidrio, acero forrado con caucho de calidad alimentaria; cloruro (PVC) o revestimiento de vinilo. La elección del material dependerá básicamente del tipo de ácidos y cáusticos que se usarán para regenerar las resinas.

1.15.2 Distribuidores y colectores

Owens y Baruth mencionan sobre la importancia de los distribuidores y su influencia en el funcionamiento de un sistema de intercambio de iones. Desafortunadamente, la mayoría de las discusiones sobre la tecnología de resinas de intercambio iónico no entran en gran detalle sobre el tema, sino que simplemente señalan la importancia de una buena distribución del flujo a utilizar dentro del tanque de las resinas de intercambio iónico.

Al realizar una breve comparación entre diferentes modelos de ablandadores se puede determinar que algunos de ellos han llegado a desarrollar diseños sofisticados y patentados en lo que a distribuidores se refiere, mientras que otros equipos sencillamente no los tienen.

Entre las principales características que se deben lograr en un buen diseño de distribuidores se tiene:

- Pérdida de carga mínima en la interface resina con el distribuidor
- Área suficientemente abierta en el distribuidor para manejar el flujo, mientras existe suficiente presión de manera que se extienda uniformemente por el área de superficie del recipiente.
- Debe realizarse modificaciones de los distribuidores para manejar los caudales lentos de regeneración en comparación con el alto caudal del ciclo de servicio y los caudales normalmente altos durante el retro lavado o colocarse otros adicionales.
- Buen apoyo y sujeción de laterales para evitar la distorsión o rotura durante los cambios en el flujo ó, durante el retro lavado, y posibles movimientos de las resinas contra laterales enterradas que se encuentren justo por encima del límite superior del lecho de resina.
- Elección adecuada de la pantalla o de la armadura del acoplamiento para proporcionar el máximo espacio abierto donde la resina se pone en contacto con la pantalla y también para permitir la limpieza de la resina de la pantalla en el flujo inverso.

Los tipos de sistemas de distribuidores o colectores más utilizados se enmarcan por lo general en las siguientes categorías:

1.15.3 Tipo cabecera lateral.

La cabecera es el tubo a través del cual el agua, químicos, o flujo de aire fluyen a los laterales, que se ramifican desde la cabecera en ángulo recto sobre un plano horizontal y son de tubería de menor tamaño. Los laterales están espaciados a lo largo de la cabecera y son de diferentes longitudes para cubrir el área del recipiente cilíndrico como se puede apreciar en la figura 1.11.

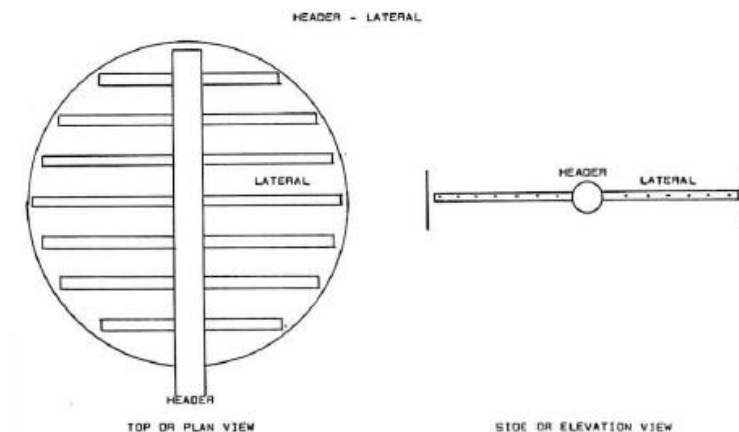


Figura 1.11 Diagrama distribuidor de cabecera lateral

Fuente: Owens, 1995, p.42

Cuando los distribuidores se encuentran en la parte superior del tanque para realizar la distribución durante la ejecución del servicio, los agujeros en los laterales se pueden colocar de forma horizontal, vertical, o en un ángulo hacia la parte superior del lecho. El posicionamiento de los orificios debe estar diseñado de manera que no exista ninguna acción de remolino o vórtice creado por el flujo entrante para evitar la perturbación de la capa superior del lecho de resina, ya que esto podría resultar en un flujo desigual a través de las secciones del lecho. El diseño incorrecto del distribuidor superior se puede reconocer mediante la apertura de la boca de inspección la parte superior después del final del ciclo de servicio y antes del ciclo de

lavado a contracorriente, y la inspección de la superficie del lecho de resina para determinar la existencia colinas y valles.

Los distribuidores de regenerante, normalmente se colocan justo por encima del nivel superior del lecho de resina en su estado más expandido o hinchado, tienen un requisito diferente que el distribuidor de la parte superior, ya que los flujos de regenerante químicos son a menudo caudales con mucho más bajas velocidades que las del flujo de servicio; por lo tanto el tamaño de la tubería, el área abierta, la selección y colocación de los agujeros perforados debe ser modificado para manejar estas condiciones diferentes. Con la ubicación del distribuidor regenerante cerca, de 6 a 12 centímetros por encima del lecho de resina expandido, el distribuidor será completamente cubierto con la resina durante el ciclo de lavado a contracorriente y en consecuencia deben ser examinados para evitar que la resina entre en el distribuidor de regenerante causando algunas irregulares o hasta el taponamiento del distribuidor.

La expansión del lecho de resina durante el inicio del lavado a contracorriente; particularmente si el lavado a contracorriente se inicia bruscamente, puede causar tensiones en el distribuidor de regenerante. Estas pueden ser lo suficientemente grandes como para causar una falla en el distribuidor si no está bien apoyado y se preparó.

En otros sistemas de intercambio por resina, como por ejemplo un sistema de lecho mixto (donde se emplea más de un tipo de resina), el distribuidor puede estar enterrado en el lecho de resina. Aquí la resistencia de los laterales y de sus apoyos o refuerzos es aún más preocupante, ya que el lecho de resina puede actuar casi como si fuera un sólido alrededor del distribuidor. Un movimiento repentino del lecho de resina causado por el cambio de la dirección sea hacia arriba o hacia abajo puede causar un desplazamiento o rotura de los laterales.

En la parte inferior, el diseño del distribuidor o colector puede estar sujeto a un número aún mayor de variables, dependiendo del diseño del sistema. En la operación

de flujo descendente o en contracorriente, el distribuidor inferior debe ser capaz de hacer lo siguiente:

- Manejar el caudal de retro lavado (alto o medio)
- Manejar el flujo regenerante (baja o variable)
- Manejar el flujo de servicio (alto)

El distribuidor inferior o colector pueden ser posicionados en un falso fondo plano o con tubos de descenso (tubos pequeños que bajan de los laterales como se ilustra en la figura 1.12, con boquillas ranuradas o tamices circulares para evitar que la resina de intercambio iónico o medios de soporte de resina entren en el colector de flujo de servicios y así mejorar el patrón de flujo en la regeneración o el flujo de retrolavado.

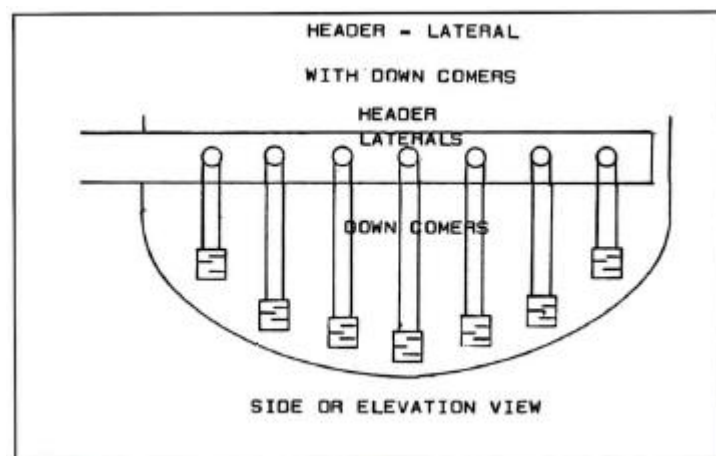


Figura 1.12 Diagrama distribuidor de cabecera lateral con llenado hacia abajo
Fuente: Owens, 1995, p.44

1.15.3.1 Tipo Radial

En inglés se lo llama “Hub and Spoke” que se lo puede interpretar como cilindro y radios; este tipo de distribuidor tiene un aspecto parecido al de la rueda de una carreta, posee en el centro un cilindro que se ancla directamente a la tubería principal del cual se desprenden varios ductos de mucho menor diámetro distribuidos en forma radial y simétrica.

Estos radios poseen perforaciones laterales similares a las del tipo cabecera lateral; a continuación en la figura 1.13 se muestra la geometría.

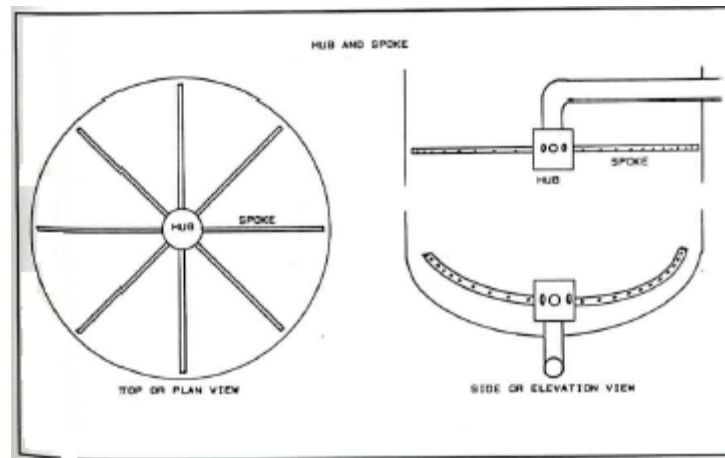


Figura 1.13 Diagrama distribuidor radial

Fuente: Owens, 1995, p.45

1.15.3.2 Tuberías y válvulas

El control de la dirección del flujo, el volumen de agua, y los diversos flujos de regenerante y residuos, requiere de algunos conocimientos de ingeniería; particularmente cuando existen sistemas en serie con más de un tanque de resina con algunas unidades en línea o en servicio, mientras que otros se encuentran en distintas etapas de la regeneración.

El dimensionamiento de la tubería y las válvulas afectarán a la caída de presión a través del sistema. La velocidad de apertura y cierre de las válvulas es importante para evitar cambios repentinos en el flujo, las velocidades elevadas también pueden crear un carnero o martillo hidráulico de agua, causando un fallo de resina.

La elección de las válvulas es de gran importancia con el fin de asegurar un cierre positivo, ya que no debe existir fuga de corriente que puedan contaminar los otros sistemas de tubería transversal, tales como una tubería de agua en bruto la cual está aislada de la corriente de agua tratada. En los sistemas semiautomáticos o completamente automáticos existe la necesidad de válvulas a prueba de fallos, que en

el caso de fallo eléctrico, hidráulico, o neumático impidan problemas con entremezclado de regenerante químicos, drenaje de camas, o la contaminación de las aguas tratadas.

1.15.4 Tanque de sal muera

En su gran mayoría son contenedores de forma cilíndrica contruidos en polietileno, ya que es un material altamente resistente a la salinidad, la capacidad se calcula en función de la cantidad y las especificaciones técnicas de la resina a ser utilizada en el ablandador. Como su nombre lo indica es el recipiente que va a contener una solución compuesta por agua y cloruro de sodio en concentraciones altas.

El contenedor generalmente se compone de dos partes; una donde se almacena el agua y se añade la sal que puede ser en grano, y la otra es un compartimento más pequeño separado del anterior por una rejilla, que sirve como separador y colector, posee una tubería con un sistema básico para la extracción de la solución el cual incorpora una válvula con un flotador que cierra el flujo cuando el contenedor alcanza un volumen bajo de solución, a continuación se muestran algunos tipos de tanques.



Figura 1.14 Tanque para depósito de salmuera
Fuente: Hidroagua, 2014

1.15.5 Inyector tipo venturi

Un inyector es un dispositivo que se sirve para bombear fluidos y se denomina tipo Venturi porque utiliza el principio Venturi para su funcionamiento. Utiliza un fluido primario o también denominado fluido motriz que ingresa a alta presión por uno de los extremos del dispositivo; dentro del cual el área de sección se reduce gradualmente con el objeto de que el fluido motriz eleve su velocidad a la vez que disminuye la presión y se alcanzan presiones negativas; en este punto existe otra conexión o conducto que es por donde ingresará el otro fluido hacia la cámara de mezclado el cual es succionado a causa de la presión negativa generada; la energía cinética se convierte en energía potencial.

Los dos fluidos se juntan en la cámara de mezcla y salen combinados por el otro extremo, los inyectores de este tipo también se utilizan para mezclar fluidos con gases, gases con gases y fluidos con fluidos, en la figura 1.15 se puede apreciar el funcionamiento.

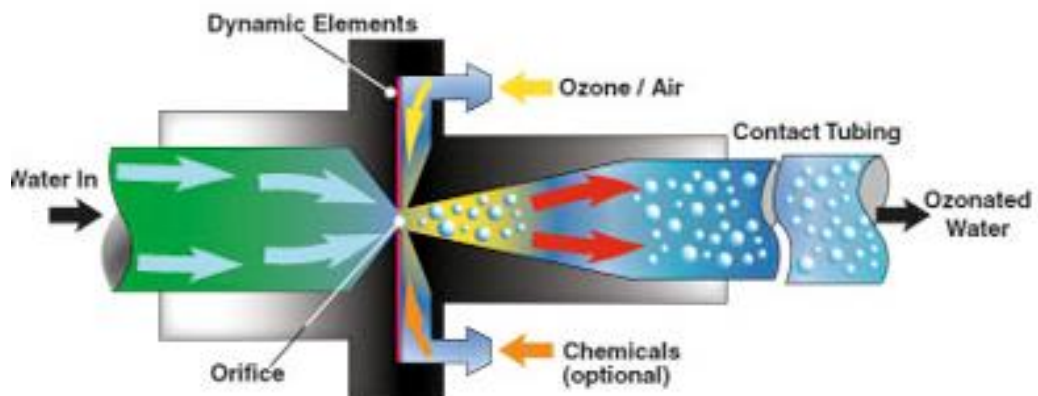


Figura 1.15 Inyector tipo Venturi

Fuente: Prozone, 2005

1.16 Resinas de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua, que se presentan o fabrican en forma de esferas o perlas con diámetros de 0.3 a 1.2 mm de tamaño efectivo, sin embargo también existen en forma de polvo.

Están compuestas de una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, incorporados a una matriz de un polímero sintético (resinas estirénicas, resinas acrílicas, etc.) y actúan tomando iones de las soluciones; generalmente agua, a la vez que ceden cantidades equivalentes de otros iones.

La principal ventaja de las resinas de intercambio iónico es que pueden recuperar su capacidad de intercambio original, mediante el tratamiento con una solución regenerante, en la figura 1.15 se puede apreciar una imagen de las esferas de intercambio iónico.

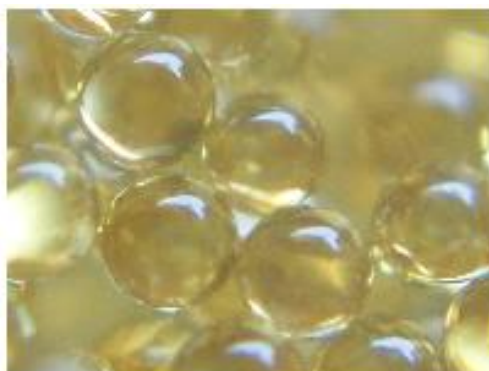


Figura 1.16 Detalle de las esferas de intercambio iónico

Fuente: Aquasalud, 2011

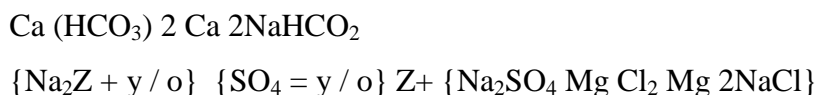
1.17 Tipos de resinas

Los intercambiadores iónicos son muy heterogéneos y diversos, por lo general la única característica común es que tienen una carga eléctrica fija, capaz de enlazar o atraer a iones de carga opuesta. Según su composición química se clasifican en dos grandes grupos: Intercambiadores Orgánicos e Inorgánicos.

1.17.1 Resinas inorgánicas

Entre los intercambiadores inorgánicos se encuentran zeolitas naturales y sintéticas, hidróxidos de Cr (III) y de zirconilo (IV), fosfato de zirconio, sales de heteropoliácidos, etc. Se los emplea principalmente en procesos relacionados con la energía nuclear, ya que son estables a la radiactividad.

Se conoce por Zeolitas (Na_2Z) a los silicatos de sodio y aluminio, su fórmula general es: $(\text{Ca,Fe,K,Mg,Na})_3 - 6(\text{Si}_3\text{O})\text{Al}_6\text{O}_{72} \cdot 24(\text{H}_2\text{O})$. Esta sustancia posee muchas propiedades, una de ellas es absorber el calcio y el magnesio del agua que la atraviesa, debido a que sus bases son permutables esto hace que en el proceso de ablandamiento el sodio de la Zeolita, pasa a la solución en forma de carbonato, sulfato o cloruro debido a que el calcio y el magnesio del agua son absorbidos por las Zeolitas; los cambios de bases son los siguientes:



Lo cual no produce formación de precipitado. El tratamiento con Zeolita produce aguas con contenidos muy bajos de calcio y magnesio.

1.17.2 Resinas orgánicas

Los intercambiadores orgánicos pueden ser naturales o sintéticos.

1.17.2.1 Naturales

Los naturales son derivados de polisacáridos, poseen tamaños de poro grandes y menor densidad de grupos cargados. Entre ellos se encuentran la celulosa y el dextrano. Por sulfonación u oxidación parcial de sustancias celulósicas, se obtienen intercambiadores catiónicos con grupos $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$. Otros intercambiadores macroporosos son los basados en la agarosa y en la poliacrilamida.

1.17.2.2 Sintéticas

Las resinas sintéticas son los intercambiadores más empleados, provienen de derivados de polímeros naturales o polímeros sintéticos:

“Derivados de Polímeros Naturales

- Carbón Sulfonado
- Lignita Sulfanada

Derivados de Polímeros Sintéticos

- Estireno divinilbenceno
- Acrílicas
- Gelulares
- Macroreticulares”

(Fing, p. 5)

1.18 Tipos de resinas de intercambio iónico según el grupo funcional

Las resinas de intercambio iónico están destinadas a varios usos, descalcificación, desnitratación, desionización. Dependiendo de la aplicación a la que se destinen existen diferentes tipos:

- Resinas catiónicas de ácidos fuerte
- Resinas catiónicas de ácidos débiles
- Resinas aniónicas de bases fuertes
- Resinas aniónicas de base débil

1.18.1 Resinas catiónicas de ácido fuerte

Se caracterizan por intercambiar iones positivos (cationes), funcionan en soluciones con cualquier pH y se destina a aplicaciones de suavizado de agua, como primera columna de desionización en los desmineralizadores o para lechos mixtos. Elimina los cationes del agua y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente se usa ácido clorhídrico (HCl).

Ejemplo:

- Resinas catiónicas de sodio: eliminan la dureza del agua por intercambio de sodio por el calcio y el magnesio.
- Resinas catiónicas de hidrógeno: pueden eliminar todos los cationes (calcio, magnesio, sodio, potasio, etc) por intercambio con hidrógeno.

1.18.2 Resinas catiónicas de ácidos débiles

Se caracterizan por tener menor capacidad de intercambio, no funcionan apropiadamente en soluciones con pH bajos, Poseen un elevado grado de expansión y contracción lo que hace aumentar las pérdidas de carga o provocar roturas en las botellas cuando no cuentan con suficiente espacio en su interior; es una resina muy eficiente, requiere menos ácido para su regeneración, aunque trabajan a flujos menores que las de ácido fuerte. Es habitual regenerarlas con el ácido de desecho procedente de las de ácido fuerte y eliminan los cationes que están asociados con bicarbonatos.

Para la mayoría de las aplicaciones de tratamiento de agua, las resinas de intercambio catiónico utilizados son de los tipos fuertemente ácidas y las débilmente ácidas. Resinas catiónicas fuertemente ácidas se pueden comparar en la fuerza del ácido en ácido sulfúrico, mientras que las resinas de cationes débilmente ácidas podrían ser comparadas con ácido acético (el ácido presente en el vinagre).

1.18.3 Resinas aniónicas de bases fuertes

Se caracterizan por intercambiar iones negativos (aniones), es la destinada a aplicaciones de suavizado de agua, como segunda columna de desionización en los desmineralizadores o para lechos mixtos. Elimina los aniones del agua y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente sosa (hidróxidosódico - NaOH) eliminan todos los aniones.

Su uso se ha generalizado para eliminar aniones débiles en bajas concentraciones, tales como: carbonatos y silicatos.

1.18.4 Resinas aniónicas de base débil

Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos sosa para su regeneración, no se puede utilizar en soluciones a pH altos; pueden sufrir problemas de oxidación o ensuciamiento. Eliminan con gran eficiencia los aniones de los ácidos fuertes, tales como sulfatos, nitratos y cloruros.

En el gráfico No. 1.17 se puede apreciar dos tipos de resinas, catiónica en la parte superior y aniónica en la parte inferior.



Figura 1.17 Parte superior resina catiónica, en la parte inferior aniónica

Fuente: Aquasalud, 2011

1.19 Estructura física y química de las resinas

La mayor parte de los materiales de esferas de intercambio iónico se fabrican usando un proceso de polimerización de suspensión, que utiliza estireno y divinilbenzeno (DVB). El estireno y DVB, ambos líquidos en un principio, se colocan en un reactor químico con más o menos la misma cantidad de agua. Asimismo está presente un agente flotador para mantener todo disperso. El reactor químico tiene un agitador que comienza a mezclar la solución de agua/sustancia química orgánica. El estireno/ DVB comienza a formar grandes glóbulos de material, y al aumentarse la velocidad de agitación, los glóbulos se dividen en gotitas más pequeñas hasta alcanzar un tamaño de más o menos un milímetro. (Avilla, 1999)

El tamaño de las esferas, la insolubilidad, y su resistencia a las fracturas son requisitos primordiales de los materiales de las esferas de intercambio iónico. Durante las diferentes fases que experimenta la resina como son el agotamiento y la regeneración ésta cambia sus dimensiones, es decir se contrae y se expande sin embargo la experiencia no deberá causar que se revienten las esferas.

Otra propiedad importante de las resinas de intercambio iónico es que el sitio activo se encuentra permanentemente ligado a la esfera. Las resinas de intercambio iónico pueden ser fabricadas en una de dos estructuras físicas, gelatinosa o macroporosa. Las resinas gelatinosas son polímeros homogéneos entrecruzados y son las resinas más comúnmente disponibles. . Éstas tienen sitios de intercambio distribuidos de manera pareja a través de la esfera. La cantidad de entrecruzamiento de DVB que se utiliza en la síntesis de una esfera determina su fortaleza relativa.

En 1959 se introdujeron de forma comercial las resinas macroporosas, están hechas con grandes poros que permiten el acceso a sitios interiores de intercambio. También se conocen como resinas macroreticulares o de poros fijos. Este tipo de resinas son fabricadas a través de un proceso que deja una red de vías a través de la esfera.

Esta estructura con apariencia esponjosa permite que la porción activa de la esfera contenga un nivel elevado de entrecruzamiento de DVB sin afectar la cinética del intercambio. Desafortunadamente, también significa que la resina tiene una menor capacidad porque las esferas contienen menos sitios de intercambio. Los “poros” pueden ocupar entre 10% y 30% del polímero. Esto reduce proporcionalmente la capacidad de intercambio iónico. (Avilla, 1999)

1.19.1 Formación grano de la resina

La fabricación de las perlas o granos de intercambio de iones de estireno-divinilbenceno se inicia con los monómeros de estireno y divinilbenceno, ambos de los cuales, como el aceite, son insolubles en agua. Una pequeña cantidad de detergente y algo de catalizador se añaden para acelerar la polimerización de los

monómeros en el polímero, y los ingredientes se agitan en el agua para conseguir suspendidos como pequeñas gotas.

La velocidad de agitación, la forma del recipiente, la temperatura, y varias otras consideraciones determinarán el tamaño de las gotitas, y por lo tanto el tamaño de las perlas de copolímero que se formarán. Para la mayoría de las aplicaciones de intercambio iónico, un tamaño de partícula en el intervalo de 20 a 50 mallas (0,0331-0,0117 pulgadas o 0,84-0,297 milímetros de diámetro) es deseable. Este rango de tamaño se ha elegido para lograr objetivos específicos.

1.19.2 Objetivos específicos logrados con un tamaño de partícula de 20 a 50 mallas.

En este rango de tamaño se logran los siguientes objetivos:

- Obtener características hidráulicas que darán una caída de presión bastante baja (libras por pulgada cuadrada por cada pie de profundidad del lecho) en un lecho de relleno, con el flujo de agua a través de un lecho clasificado (clasificados con las perlas más pequeñas en la parte superior y las perlas más grandes en la parte inferior).
- Tener una cantidad aceptable de la expansión del lecho cuando el agua ingresa en flujo ascendente a través del lecho para realizar el lavado a contracorriente (para clasificar a la cama y para eliminar las partículas finas o la suciedad de la cama de resina).
- Mantener la mayor área de superficie en las perlas de intercambio iónico y lograr una velocidad de reacción razonablemente en altos caudales por unidad de volumen de resina.

1.20 Reacciones con resinas de intercambio iónico

El criterio básico para describir las reacciones de intercambio iónico es que un ion a ser intercambiado tiene que estar en solución y el otro ion en un sólido insoluble (o en algunos casos en un líquido inmiscible).

Arcillas y silicatos de aluminio y sodio (tanto naturales como sintéticos), que eran los precursores de las resinas de intercambio iónico modernas, estaban limitadas en su uso a aplicaciones de ablandamiento, ya que no eran suficientemente estables a pH bajo o alto.

El proceso de ablandamiento se lleva a cabo a partir de la resina o zeolitas en la forma de sodio y después poniendo en contacto la resina con agua que contiene iones de calcio y magnesio (dureza). El calcio y el magnesio divalente intercambian de iones para el ion de sodio en la resina sólida, con los iones de sodio entrando en la solución de agua en lugar de la de calcio y magnesio, eliminando de este modo la dureza y la obtención de agua blanda o ablandada.

En la figura 1.18, donde la resina se representa como (R), se muestra una ecuación balanceada con cuatro iones monovalentes de sodio de la resina de ser reemplazado con uno cada uno de calcio divalente y magnesio. Los iones resultantes en el agua serán equilibrados en cuanto a iones positivos y negativos, ya que es un requisito necesario en todas las reacciones de intercambio iónico. Obviamente, el número de sitios de intercambio de la resina será más que los que se muestran en la ecuación de la reacción de la muestra, ya que esto sólo se utiliza para representar la reacción que tiene lugar.

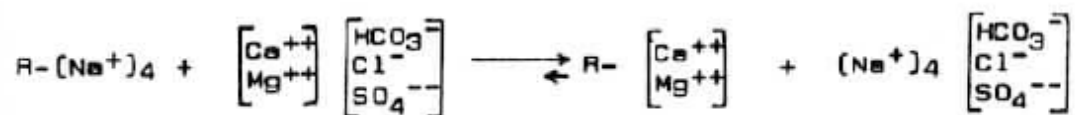


Figura 1.18 Ecuación balanceada

Fuente: Owens, 1995, p.34

1.21 Parámetros para la selección de un desmineralizador.

Para determinar el tipo de desmineralizador más adecuado según la necesidad se debe analizar los siguientes parámetros:

- Determinar la calidad y el volumen de agua diarios requeridos
- Analizar las calidades de los suministros de agua disponibles
- Seleccionar el tipo de pretratamiento necesario

- Decidir el sistema de desmineralización y el tipo de resina más adecuado considerando el costo beneficio.
- Especificar la duración del ciclo, el tipo de regenerante y la disponibilidad de almacenamiento de agua tratada.

1.22 Ciclos de funcionamiento del ablandador de agua

Como se definió anteriormente, los ablandadores de agua tienen la función de remover o eliminar la dureza del agua mediante un proceso denominado intercambio iónico. Para que un ablandador de agua funcione en forma correcta, su diseño debe permitir la operación de cuatro ciclos:

- Ciclo de servicio o ablandamiento
- Ciclo de retro lavado
- Ciclo de regeneración
- Ciclo de enjuague

1.22.1 Ciclo de servicio o ablandamiento

Durante este ciclo, el ablandador se encuentra en operación normal, el agua dura ingresa a través de válvulas y tuberías hasta un deflector que se encuentra ubicado en la parte superior del tanque de resina, el cual se encarga de distribuir de forma uniforme el agua sobre la resina de intercambio iónico.

El agua fluye hacia abajo tomando contacto con la resina. El medio que hace posible este intercambio se llama resina catiónica, la cual está compuesta de granos de poliestireno con carga negativa.

Cuando la dureza (Mg^{2+} y Ca^{2+}) entra en contacto con la resina, los iones son capturados por las cargas negativas de la resina, liberando a los iones de sodio y potasio (Na^{+} y K^{+}).

A continuación en la figura 1.19 se muestra el proceso realizado durante el ciclo de ablandamiento.



Figura 1.19 Proceso del ciclo de ablandamiento
Fuente: neWater, 2014

Como resultado, esto es precisamente lo que sucede, con el calcio se desplaza el magnesio debido a que los flujos de servicio prosiguen hacia abajo del lecho de resina. Con la resina catiónica en la forma de sodio, el calcio y el magnesio (siendo divalentes) se desplazan, el sodio monovalente a partir de la resina y se adhiere a los sitios de intercambio de la resina. Como continúa el paso de más agua dura a través del lecho de resina, la capa de resina superior se convierte en la forma de calcio y magnesio. Sin embargo, debido a que el magnesio no se mantiene tan firmemente al sitio de intercambio de resina como el calcio. Éste último desplaza el magnesio más abajo en el lecho de resina de manera que la capa superior de resina se convierte predominantemente en forma de calcio, con el magnesio en una capa por debajo, y el resto del lecho de la resina en forma de sodio, como se aprecia en la figura 1.20.

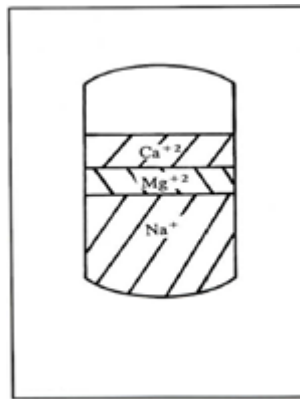


Figura 1.20 Distribución de iones en el lecho durante el ablandamiento
Fuente: Owens, 1995, p.62

A medida que la ejecución del servicio continúa, la banda o franja de calcio continúa expandiéndose hacia abajo de la columna y desplaza la banda de magnesio, que a su vez continúa expandiéndose más abajo en la columna de resina y a su vez desplaza el sodio. Estas bandas de calcio y de magnesio no son completamente distintas, ya que dependen de la velocidad de flujo y la uniformidad de distribución de flujo. Cuanto mayor sea el caudal, menos definidas o claras serán las bandas.

El flujo de agua que ya se convirtió en blanda continúa descendiendo, atraviesa un pequeño lecho de grava para luego ingresar por un colector el cual dirigirá el agua hasta un depósito denominado tanque diario para su utilización; la figura 1.21 muestra un esquema del funcionamiento del ciclo de servicio, también llamado ciclo de ablandamiento.

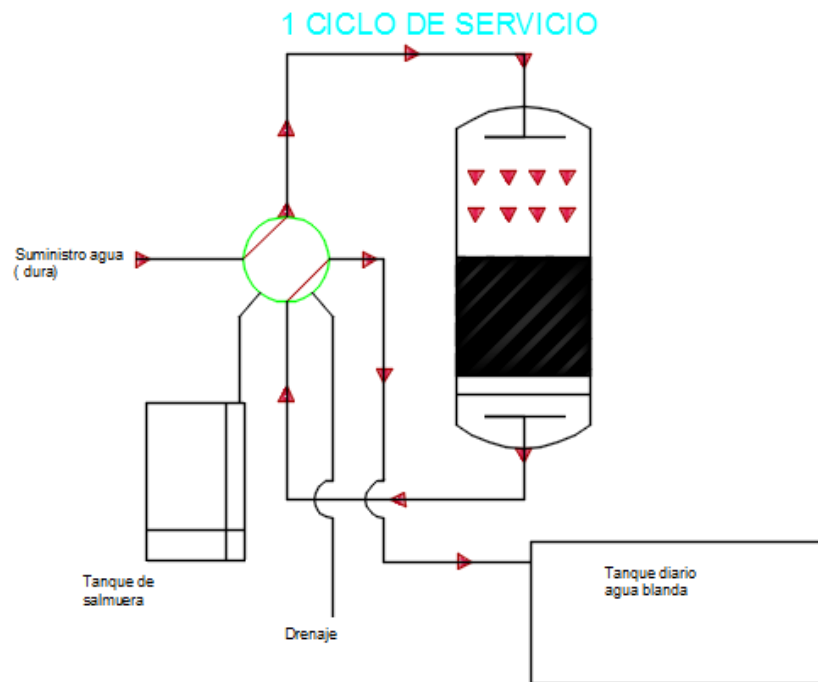


Figura 1.21 Esquema de funcionamiento en ciclo de servicio

1.22.2 Ciclo de retrolavado

Cuando la capacidad de ablandamiento de la resina se agota, el ciclo de retrolavado es el primer paso para que se realice el proceso de regeneración de la resina. Durante este ciclo, mediante la manipulación de válvulas un caudal elevado de agua es

inyectado a contra corriente, es decir en sentido opuesto al ciclo de servicio; el agua ingresa de abajo hacia arriba, lo que provoca una expansión de la resina.

El flujo de agua ascendente a través del tanque del suavizador, elimina la turbidez y otros sedimentos que se acumulan durante el ciclo de servicio y los elimina del sistema por el drenaje. Este ciclo de lavado es de gran importancia para garantizar el mejor funcionamiento del lecho de resina por las siguientes razones:

- Después de un largo ciclo de servicio con altas velocidades de flujo, el lecho de resina tiende a comprimirse y a palmarse como efecto de su hinchazón, por lo cual es necesario descomprimirla, esto se realiza expandiendo el lecho mediante un flujo alto a contra corriente esto provocará que los granos de resina se muevan y por consiguiente se expanda el lecho; con esto también se consigue limpiar la suciedad suspendida en la resina o partículas que pueden haberse filtrado desde el agua de alimentación.
- La acción de lavado de las perlas de resina durante el retrolavado ayuda a eliminar materiales que pueden haber revestido la resina. Algunas de las partículas de polvo pueden ser más pesadas que las resinas de baja densidad, pero por lo general son mucho más pequeñas en tamaño, por lo que se necesita lavar hidráulicamente la resina. Cuanto más rápido sea el caudal hacia arriba y pueda ser mantenido el lecho de resina ligeramente por debajo de la parte superior del distribuidor, mejor serán los resultados.
- Los granos de resina después de un largo periodo de uso, tienden a romperse y fragmentarse, dando lugar al aparecimiento de las denominadas multas, que son partículas de malla con dimensiones de (0,297 milímetros (mm) o 0.0117 pulgadas de diámetro); es necesario eliminar estas multas de resina para mantener buenas condiciones hidráulicas del lecho de resina, prevenir la canalización y la caída de presión.
- Para clasificar el lecho de resina ubicando los granos más grandes de resina en la parte inferior y granos más finos en la parte superior. Esta clasificación según el tamaño del grano proporciona las mejores condiciones para un flujo uniforme de los regenerantes, los flujos de enjuague, y el flujo de servicio a través de toda el área del lecho de resina.

Las condiciones para el lavado a contracorriente varían con cada tipo de resina debido a sus distribuciones de partículas, uniformidad de las partículas de tamaño, las diferencias de densidad de las partículas, y la posible diferencia en el grado de agotamiento. Las resinas de cationes generalmente tienen densidades más altas que las resinas aniónicas y por lo tanto requieren velocidad lineal superficial mayor para obtener la expansión del lecho de resina deseable (40% a 50%)

El tiempo del lavado a contracorriente será dependiente de la cantidad de residuos presente en el lecho de resina, y el lavado a contracorriente debe ser continuado hasta que el flujo está limpio y claro. Por lo general, 10 a 15 minutos es suficiente, pero puede haber casos extremos en 20 a 30 minutos puede ser necesaria. (Owens, 1995).

En la figura 1.22 se aprecia el ciclo de retro lavado.

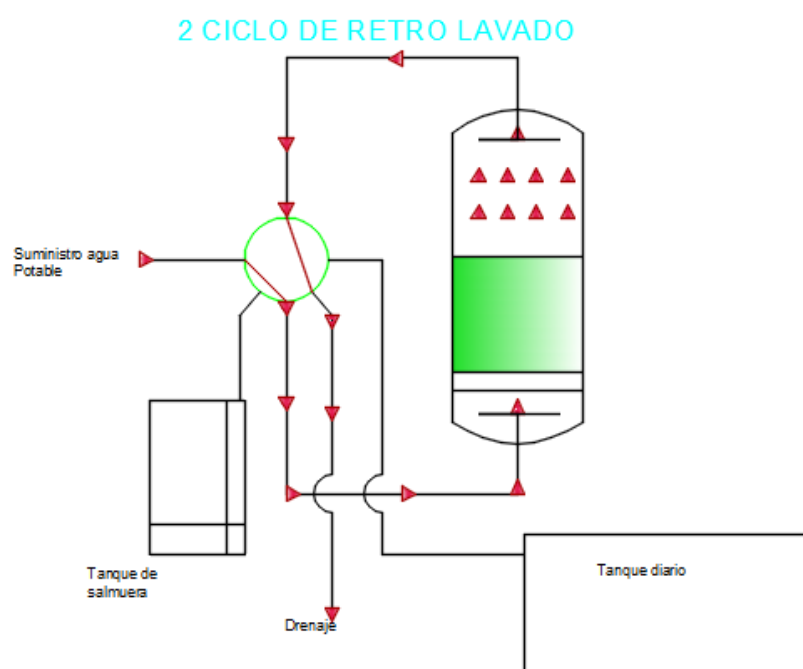


Figura 1.22 Esquema de funcionamiento en ciclo de retrolavado

1.22.3 Ciclo de Regeneración

El ciclo de regeneración es quizá el más importante de todos, algunos lo consideran como en el verdadero corazón de la operación de intercambio iónico, porque es aquí donde la regeneración química de las resinas de intercambio iónico tiene lugar; por consiguiente es aquí que la variación en la resina, y también el control, son de mayor importancia, tanto para la calidad y la cantidad de agua que se puede producir durante el ciclo de servicio, y también para los costos de operación.

La regeneración es el proceso de revertir la reacción que se produjo en el ciclo de servicio. Los principales factores que deben ser considerados en este ciclo son: la concentración, la cantidad de productos químicos regenerantes, tiempo de contacto, y la temperatura. Estos factores variarán, dependiendo del tipo de resina, tipo de producto químico regenerante, la eficiencia del equipo, y la calidad deseada del agua producida.

Siempre se debe tener presente que la condición del lecho de resina agotada para todos los tipos de resina es una cama iónicamente unida, con los iones más fuertemente arraigadas en la parte superior de la cama, seguido por bandas de iones progresivamente menos fuertes, con los iones más débiles en la parte inferior de la cama. Esta es la razón por la cual en la mayoría de los sistemas, los regenerantes químicos primero entran en contacto con el ion que se mantiene más firmemente en la parte superior del lecho de resina. Esto es por lo general con el producto químico regenerante en su concentración más alta.

El producto químico que se usará como regenerante para la resina catiónica será una disolución de cloruro de sodio (sal común) con una concentración que varía entre el 15 y 30%. El fabricante de resinas determina el porcentaje exacto que debe tener la dependiendo del tipo de resina.

Todos los sistemas de ablandamiento de agua poseen un tanque secundario donde se almacenará la sustancia regenerante; en este caso para el cloruro de sodio por lo

general son depósitos construidos en material polímero. A continuación se representa el esquema de funcionamiento del ciclo de regeneración.

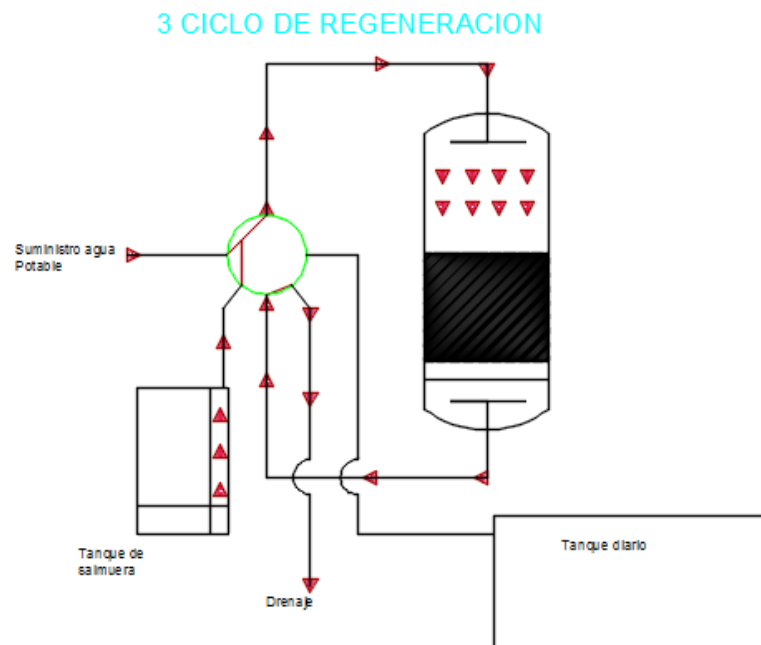


Figura 1.23 Esquema de funcionamiento ciclo de regeneración

1.22.4 Ciclo de enjuague

El ciclo de enjuague sirve para eliminar de la resina el residuo o exceso de sal que fue empleado para realizar el proceso de regeneración; esto se realiza introduciendo un caudal de agua elevado en el mismo sentido que ingresó el regenerante, luego de atravesar el lecho de resina estas aguas son canalizadas hacia el desagüe.

Cuando el agua que sale del enjuague no contiene sal, se puede dar por terminado el ciclo quedando el equipo preparado para volver a empezar un nuevo ciclo de ablandamiento.

Algunos fabricantes dividen al ciclo de enjuague en dos partes; un enjuague denominado lento y el otro rápido, con el primero se inyectan pequeños caudales de agua y se consigue desplazar los remanentes de sal hacia la parte inferior del lecho de resina mientras que en la segunda parte se aumenta el caudal para que el remanente

sea eliminado en la totalidad; sin embargo en equipos pequeños el ciclo se lo realiza en una sola fase; en la siguiente figura se muestra el flujo del ciclo de enjuague.

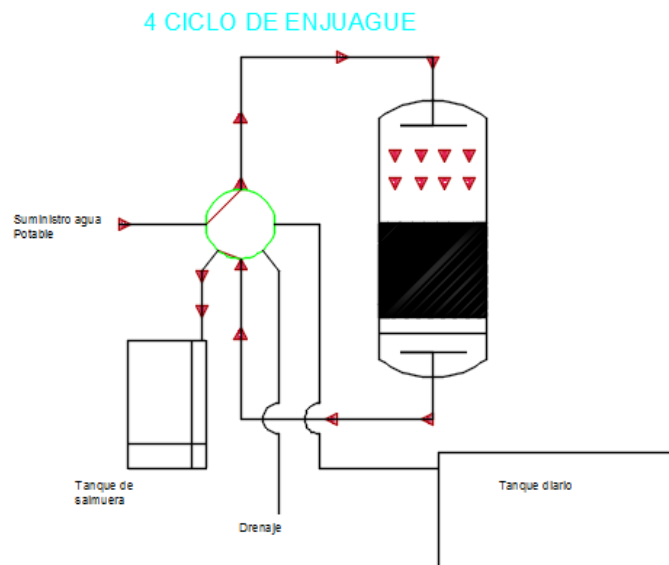


Figura 1.24 Esquema de funcionamiento en ciclo de enjuague

1.23 Conclusiones capítulo 1

- El intercambio iónico solo se produce cuando uno de los iones se encuentra en una sustancia acuosa y el otro en un sólido.
- El tipo de resina más adecuado para construir el ablandador de agua en función de los minerales que se desean eliminar es la del tipo catiónica fuerte que usa como regenerante la salmuera.
- Para que el ablandador de agua trabaje de forma correcta debe realizar los cuatro ciclos: servicio, retrolavado, regeneración y enjuague.

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL ABLANDADOR

2.1 Introducción

Para el desarrollo de este capítulo es necesario conocer algunas condiciones iniciales como son las características y potencias de los equipos que serán abastecidos, la calidad del agua a ser tratada, y las condiciones de dureza que se desea obtener al final del proceso. De igual forma existen varios parámetros de diseño que deben ser considerados al momento de diseñar un equipo para ablandar agua.

En este capítulo se definirá el concepto de profundidad mínima del lecho, altura de pared lateral mínima, parámetros importantes de diseño como velocidad lineal, velocidad espacial, y se realizará un breve análisis de las denominadas variables fundamentales.

Como parte del diseño se calculará la capacidad de trabajo, dimensiones del lecho de resina, dimensiones del tanque de intercambio, la cantidad de regenerante necesaria para realizar el ciclo, la cantidad de sal a usarse por cada galón de agua; así como también los tiempos de contacto.

Se determinarán las condiciones necesarias para el proceso de ablandamiento, proceso de retro lavado, el proceso de regeneración y enjuague.

También se analizarán criterios de selección que permitan definir las partes y piezas que serán usadas para la construcción del equipo, así como la selección del diámetro y tipo de material a ser usado en las tuberías.

Se definirán los factores de seguridad que sean necesarios para que el equipo sea eficiente y seguro.

2.2 Selección del tipo de ablandador

La eliminación de partículas de calcio y de magnesio presentes en el agua se puede realizar mediante la utilización de ablandadores de tipo mecánico y de tipo químico; a continuación se analizan algunos parámetros en la tabla 2.1

| TIPO DE ABLANDADOR | PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO | CARACTERÍSTICAS | APLICACIONES | COSTOS DE EQUIPO |
|--------------------|--|--|---|------------------|
| MECÁNICO | El fluido a presión pasa a través de varias membranas de poliamida | Agua destinada al consumo humano | Desalinización de agua de mar y salobre | Alto |
| | | Baja capacidad de producción | Industrias farmacéutica, eléctrica, producción de energía | |
| | | Membranas requieren frecuente limpieza | Descontaminación de aguas urbanas | |
| QUÍMICO | El fluido pasa a través de resinas de intercambio iónico | Agua destinada al consumo industrial y doméstico | En procesos de producción de vapor | Bajo |
| | | Capacidad de producción media | En viviendas | |
| | | Las resinas requieren ser regenerada con poca frecuencia | En criadero de peces y acuarios | |

Tabla 2.1 Cuadro comparativo

De la información contenida en la tabla 2.1 se desprende que en función de la necesidad existente, y las bondades que brinda cada equipo, el que mejor se adapta al requerimiento de producción de agua, es el ablandador de agua de tipo químico.

2.3 Parámetros de diseño

Existen parámetros de diseño que deben ser considerados para la construcción de ablandadores de tipo iónico, los cuales se derivan principalmente de un extenso estudio de las propiedades físicas, químicas y mecánicas más importantes de las resinas que en su mayoría fueron determinadas de forma experimental. Es necesario cumplir con estos parámetros para que de esta manera conseguir condiciones ideales; que en el mundo de los tratamientos de agua se las conoce como **“Condiciones Hidráulicas”**. Los parámetros de diseños son:

2.3.1 Altura mínima del lecho de resina (h)

“Se refiere a la altura mínima que debe tener un lecho de resina, esto en función de que debe existir un tiempo mínimo de contacto entre el agua dura y las resinas para garantizar que se lleve a cabo el intercambio de iones. Se establece como altura mínima el valor de 30 pulgadas (76.2cm)”. (Owens, 1995, p. 35)

2.3.2 Altura de pared lateral mínima (H)

Es la altura mínima que deberá tener el tanque donde se producirá el intercambio iónico, en función de la profundidad mínima del lecho; se define el valor de “la pared lateral mínima” en 48 pulgadas el cual se obtiene de la siguiente manera:

“30 inch bed depht
12 inch free board (40%)
6 inch underbending”. (Owens, 1995, p. 36)

Esto significa que si se considera una profundidad mínima para el lecho resina de 30 pulgadas, se debe dejar por arriba del lecho una altura libre equivalente a un 40% de la altura del lecho; esta consideración se debe a que la resina absorbe agua durante el proceso por lo cual se incrementa su volumen el cual puede aumentar hasta en un 40%. También se recomienda dejar por debajo de la base inferior del lecho una profundidad mínima de 6 pulgadas para colocar grava y el colector; se representan en la figura 2.1

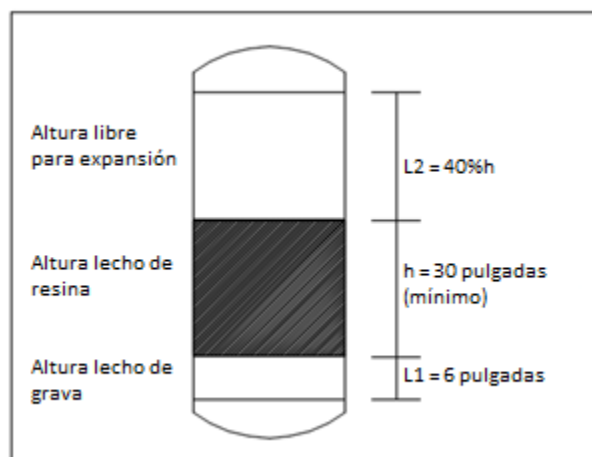


Figura 2.1 Longitudes que conforman la pared lateral mínima

2.3.3 Velocidad lineal

En mecánica de fluidos se puede definir la velocidad lineal como la velocidad que tiene una cantidad de fluido que circula a través de una sección transversal de un ducto por unidad de tiempo.

$$v_l = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

Dónde:

- Q : es caudal (gpm)
- A : es el área de una sección (ft²)
- v_l : es la velocidad lineal (gpm/ft²)

“Para ser satisfactorias las velocidades lineales deben encontrarse en el rango de **4 a 10 (gpm/ft²)**; se utiliza normalmente el valor de **8 (gpm/ft²)**” (Owens, 1995, p. 38)

2.3.4 Velocidad espacial

La velocidad espacial o también conocida como velocidad de reacción se la puede definir como la cantidad de sustancia que se transforma en una determinada reacción por unidad de volumen y tiempo.

$$v_e = \frac{Q}{VR} \quad (2.2)$$

Dónde:

- Q : es caudal (gpm)
- VR : es el volumen de resina necesaria (ft³)
- v_e : es la velocidad espacial (gpm/ft³)

“Para ser satisfactorias las velocidades espaciales deben encontrarse en el rango de **0.25 a 5 (gpm/ft³)**; se utiliza normalmente el valor de **2 (gpm/ft³)**” (Owens, 1995, p. 39)

2.4 Variables fundamentales

El diseño del ablandador de agua tipo iónico empieza con el análisis de las variables fundamentales.

2.4.1 Concentración total de sólidos disueltos

Se realizó el análisis de dureza a tres muestras de agua potable tomadas en uno de los grifos existentes en el laboratorio de termodinámica, el resultado obtenido fue:

$$68,4 \frac{mg}{l} CaCO_3$$

Para convertir ppm de $CaCO_3$ a granos/gal de $CaCO_3$ se usa un factor de conversión.

$$1 \frac{grano}{galon} = \frac{0.0001428 \cdot 1000000}{8.33} = 17,1 \text{ de } CaCO_3$$

$$\frac{68,4 \frac{mg}{l} CaCO_3}{17,1 \text{ de } CaCO_3} = 4 \frac{granos}{galon}$$

2.4.2 Características del agua a tratar

El agua antes de recibir un proceso de potabilización puede estar contaminada por muchos minerales y sustancias potencialmente dañinas para el consumo humano; se puede apreciar una lista de esos minerales en la tabla 2.2

| Substance | Atomic or Molecular Weight | Equivalent Weight | Substance to $CaCO_3$ Equivalent |
|--------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------------|
| Aluminum | 27.0 | 9.0 | 5.56 |
| Ammonia | 17.0 | 17.0 | 2.94 |
| Ammonium | 18.0 | 18.0 | 2.78 |
| Barium | 137.4 | 68.7 | 0.73 |
| Bicarbonate | 61.0 | 61.0 | 0.82 |
| Calcium | 40.1 | 20.0 | 2.50 |
| Carbonate* | 60.0 | 60.0 | 0.83 |
| Carbon dioxide* | 44.0 | 44.0 | 1.14 |
| Chloride | 35.5 | 35.5 | 1.41 |
| Iron (Fe^{2+}) | 55.8 | 27.9 | 1.79 |
| Iron (Fe^{3+}) | 55.8 | 18.6 | 2.69 |
| Magnesium | 24.3 | 12.2 | 4.12 |
| Nitrate | 62.0 | 62.0 | 0.81 |
| Phosphate | 95.0 | 31.7 | 1.58 |
| Potassium | 39.1 | 39.1 | 1.28 |
| Silica* | 60.1 | 60.1 | 0.83 |
| Sodium | 23.0 | 23.0 | 2.17 |
| Strontium | 87.6 | 43.8 | 1.14 |
| Sulfide | 32.1 | 16.0 | 3.13 |
| Sulfate | 95.1 | 48.0 | 1.04 |

*Carbonate, carbon dioxide, and silica react as monovalent ions in ion exchange.

Tabla 2.2 Minerales presentes en el agua

Fuente: Owens, 1995, p.17

El agua que se utilizará para abastecer los equipos térmicos es potable, lo que significa que ya está exenta de varios minerales; por lo cual la atención se centra específicamente en el contenido de cationes de calcio y de magnesio.

2.4.3 Agua blanda requerida

El ablandador de agua se dimensiona en función de una cantidad de flujo que se requiere obtener, a continuación se determinará el flujo o caudal requerido para abastecer los equipos térmicos existentes en el laboratorio de termodinámica:

La caldera existente tiene una potencia de 6 BHP; en condiciones normales una caldera consume 4.25 galones cada hora y por cada BHP de potencia de donde se deriva la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{4.25 \text{ gal}}{\text{hr} * \text{BHP}} \cdot X \text{ BHP} \quad (2.4)$$

Dónde:

Q = Caudal requerido (gal/h)

X = Potencia de la caldera (BHP)

Al reemplazar los valores se obtiene que:

$$Q = \frac{4.25 \text{ gal}}{\text{hr} * \text{BHP}} \cdot 6 \text{ Bhp} \cdot \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 0,5 \text{ gpm}$$

Para abastecer de agua a la caldera se requiere un flujo de 0,5 gpm

Consideraciones para el diseño

Durante el proceso de elaboración de este proyecto se consideró la posibilidad de abastecer con agua blanda a todos los equipos que se encuentran instalados en el laboratorio de termodinámica aunque no se traten específicamente de equipos térmicos. Esta consideración nace en función de que durante la investigación se encontró información que muestra que el calcio y el magnesio presentes en el agua fría, también forman calcificaciones tendiendo a manchar las superficies que están en contacto constante con el agua dura.

En este sentido, considerando que la mayoría de los equipos didácticos instalados en el laboratorio poseen recipientes para el almacenamiento de agua construidos en material acrílico o vidrio; con el objeto de preservarlos en buen estado se analizará la posibilidad de que sean abastecidos con agua suministrada por el ablandador que se plantea diseñar.

Los equipos y el requerimiento de agua se indican en la tabla 2.3

| EQUIPOS | CAUDAL | VOLUMEN |
|--|---------------|-------------------|
| Caldera de 6BHP | 0.5 gpm | |
| Intercambiador de calor tubular HT30XE | 0.5 gpm | 1.5 l |
| Prototipo control automático de nivel y caudal de líquidos | | 18 gal |
| Medidor de pérdidas de presión de agua en tuberías | | 25 gal |
| Banco de pruebas para bombas en serie y en paralelo | | 4 gal |
| Turbina Pelton FM62 | | 8 gal |
| Turbina de reacción FM61 | | 8 gal |
| Banco de pruebas conexión de bombas | | 19 gal |
| Bomba centrífuga FM50 | | 5 gal |
| Intercambiador de calor 1 | | 25 gal |
| Bomba de calor | | 3.24 gal |
| Equipo de cavitación F1-28 | 1 gpm | |
| TOTAL | 2 gpm | 115.24 gal |

Tabla 2.3 Requerimiento de agua en los equipos

Como se puede apreciar en la tabla 2.2, nueve de los equipos no requieren ser abastecidos de flujo constante, debido a que poseen tanques de almacenamiento de agua con volúmenes definidos y en la mayoría de los casos, el volumen de agua es reutilizado durante los procesos.

Asumiendo algunas consideraciones respecto a frecuencias de uso, se mostrará que el ablandador de agua tendrá la capacidad de producir suficiente para abastecer de agua a la caldera en el caso que esta funcione de forma continua y a la vez se pueda almacenar otra cantidad en el tanque diario que servirá para ser usada en los otros equipos.

Para dimensionar el equipo se seleccionó como valor base el requerimiento de la caldera y del intercambiador que requieren un flujo de agua continuo; correspondiente a 1 gpm, y para abastecer a todos los equipos de la tabla 2.2 se establece un tiempo máximo de dos horas, con lo que se requerirá 1gpm adicional. Debido a que se requiere un valor de consumo diario; se considera que los equipos de flujo continuo trabajaran 4 horas diarias lo que significa que consumirían 240 galones por día.

2.4.4 Volumen de resina

El volumen de resina necesario se determinará a través de un sistema de cálculo iterativo que revisa en forma secuencial el cumplimiento de determinados parámetros de diseño establecidos por los fabricantes de resinas.

2.4.5 Selección de resina

Para determinar qué tipo de resina es la más adecuada, se debe considerar los resultados del análisis del agua, la calidad de agua que se desea obtener en función del uso que se le dará, en este caso el objetivo principal es remover las partículas de calcio y de magnesio presentes en el agua, la presencia de estos minerales determina el grado de dureza que posee el agua.

Los iones que poseen estos dos minerales tienen cargas positivas; por lo cual se denominan cationes, en este caso se debe elegir un tipo de resina que pueda eliminar iones de minerales con cargas positivas; esta característica la poseen las resinas catiónicas.

Para el proyecto se utilizará resinas del tipo catiónica fuerte ya que presenta las mejores características y además utiliza como regenerante un material de bajo coste, fácil manipulación, bajo riesgo de almacenaje y fácil de adquirir; la información técnica se presenta en el Anexo 3.

2.4.6 Producción de agua desmineralizada entre regeneraciones

Ésta es una variable fundamental muy importante en ablandadores que alimentaran equipos de funcionamiento continuo como los existentes en fábricas o industrias; en este caso pierde importancia debido a que el equipo no alimentará máquinas de trabajo continuo. Este valor se determinará multiplicando la capacidad de trabajo de la resina por un periodo (en días) que es definido para efectos del cálculo.

2.5 Capacidad de trabajo (Cap)

Se determina la capacidad de trabajo que deberá tener el equipo y se calcula a través de dos parámetros fundamentales que son: dureza y caudal

$$Cap = Q \cdot D \cdot fc \quad (2.5)$$

Dónde:

Q = caudal requerido, gal/día = 240

D = dureza, granos/gal = 4

Fc = factor de seguridad (1.25)

Al remplazar los datos se obtiene:

$$Cap = 1\,200 \frac{\text{granos}}{\text{día}}$$

Se considera un periodo de 9 días de servicio antes de la regeneración y se calcula la capacidad de trabajo en ese periodo.

$$1200 \frac{\text{granos}}{\text{día}} \cdot 9 \text{ días} = 10\,800 \text{ granos}$$

1ft³ de resina tiene 25 000 granos, del cálculo anterior se deduce la primera estimación del volumen de resina que se debería utilizar; considerando un periodo para el ciclo de servicio de 9 días y sería de aproximadamente 0,5ft³.

2.6 Dimensionamiento del lecho de resina

La presentación de menor volumen de resina que se puede encontrar a la venta es de 1ft³ y debido a que este método de cálculo es iterativo, se considera el volumen de resina en 1ft³.

El tanque de intercambio será de forma cilíndrica de donde se deriva:

$$V_c = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (2.6)$$

$$V_c = A \cdot h$$

El valor mínimo recomendado por el fabricante $h = 2,30$ ft y un volumen de resina de 1 ft^3 , se calcula el área de sección transversal A

$$A = \frac{V_c}{h}$$

$$A = 0,43 \text{ ft}^2$$

Se verifica el valor de la velocidad lineal utilizando la ecuación (2.1)

$$v_l = \frac{2 \text{ gpm}}{0,43 \text{ ft}^2} = 4,65 \frac{\text{gpm}}{\text{ft}^2}$$

Para que se cumplan las condiciones de flujo, las velocidades lineales deben encontrarse en el rango de **4 a 10 (gpm/ft²)**; el valor que se obtuvo del cálculo anterior si está dentro del rango; cuando el valor calculado está fuera del rango, se toma el valor recomendado de **8 gpm/ft²** y se calcula el área ideal (A_i)

$$A_i = \frac{Q}{v_l}$$

Con el valor obtenido se vuelve a calcular el volumen

$$V_c = A_i \cdot h$$

$$V_c = 0,43 \text{ ft}^2 \cdot 2,30 \text{ ft}$$

$$V_c = 0,98 \text{ ft}^3$$

Con el volumen obtenido, se verifica el valor de la velocidad espacial.

$$v_e = \frac{Q}{V_r} = \frac{2 \text{ gpm}}{0,98 \text{ ft}^3} = 2,04 \frac{\text{gpm}}{\text{ft}^3}$$

Donde V_r es el volumen de resina.

Para que se cumplan las condiciones de flujo, las velocidades espaciales deben encontrarse en el rango de **0,25 a 5 (gpm/ft³)**; el valor obtenido del cálculo está dentro del rango.

Cuando el valor que se obtiene está fuera del rango, se debe tomar el valor recomendado de **2 (gpm/ft³)** y se vuelve a calcular el volumen con la siguiente formula:

$$v_r = \frac{Q}{v_e}$$

Una vez que se ha obtenido un valor para el V_r que si cumple con las condiciones dinámicas o de flujo, se procede a despejar el valor del radio del cilindro.

$$V_c = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$d = 0,74ft = 8,8 plg$$

Con los datos obtenidos las dimensiones reales del lecho de resina, cumplen con las condiciones dinámicas.

Es importante recalcar que el diámetro calculado no debe variar significativamente, sin embargo lo que si puede aumentar es la altura h, esto debido a que todo el cálculo se realizó utilizando una h mínima que garantiza que el agua tenga el tiempo mínimo de contacto con la resina para que se produzca el intercambio iónico.

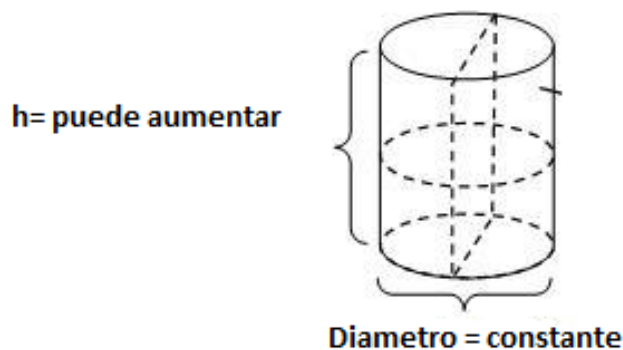


Figura 2.2 Longitudes del lecho de resina

Una vez que se ha realizado el ajuste del volumen variando la altura h de haber sido necesario, se considera otras recomendaciones para el diseño respecto al área libre que debe existir para que la resina pueda expandirse sin causar problemas al equipo.

2.7 Dimensionamiento del tanque de intercambio

Para el dimensionamiento del tanque se consideran las variables representadas en la figura 2.3

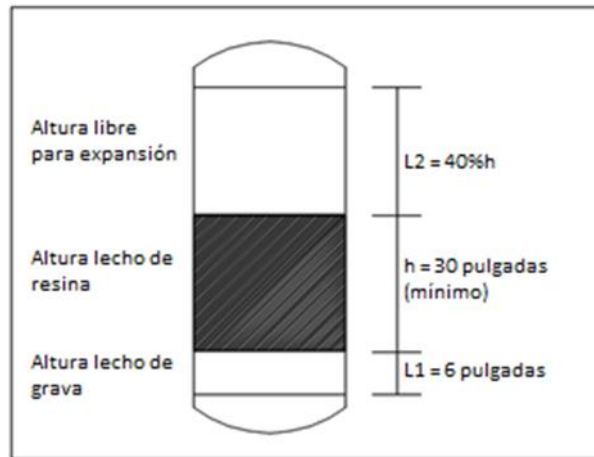


Figura 2.3 Longitudes que componen la altura del tanque

La altura total del contenedor se la denomina pared lateral mínima (H) y está definida por la siguiente ecuación:

$$H = L1 + h + L2 \quad (2.7)$$

Dónde:

H = Altura de pared lateral mínima.

L1 = Altura del lecho de grava.

h = Altura del lecho de resina.

L2 = Altura libre para expansión.

$$H = 6 \text{ plg} + 30 \text{ plg} + (30 * 0,40)$$

$$H = 48 \text{ plg}$$

La medida del diámetro interno del tanque corresponde al diámetro del lecho de resina calculado anteriormente; de esta forma quedan determinadas las dimensiones del tanque de intercambio.

$$H = 48 \text{ plg}$$

$$d = 8,8 \text{ plg}$$

2.8 Cálculo de la cantidad de regenerante

El compuesto que se utilizará para regenerar la resina catiónica fuerte será una solución en agua de cloruro de sodio (NaCl), mejor conocida como sal en grano. Esta solución se debe preparar a una concentración del 26%. (Rohn and Hass, 1988, p. 37)

“Para la regeneración de 1ft^3 se debe usar entre 8 y 15 libras de sal”; entonces, para preparar salmuera (solución de $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$) a una concentración del 26% se debe diluir 3 libras de sal por cada galón de agua. (Rohn and Hass, 1988, p. 37)

Para este cálculo se usará 12 libras de sal por cada 1ft^3 de resina, considerando las relaciones anteriores se desprende que para lograr una concentración de salmuera al 26%, utilizando 12 libras de sal, se necesita 4 galones de agua.

La salmuera que será inyectada en el lecho de resina, para que cumpla con eficiencia el ciclo de regeneración deberá tener una concentración del 10% y se calcula usando la siguiente ecuación:

$$Q_s \cdot C_s = Q_w \cdot C_w \quad (2.8)$$

Dónde:

Q_s = cantidad de solución salmuera (gal)

C_s = concentración de solución (%)

Q_w = cantidad de agua (gal)

C_w = concentración de solución en agua (%)

Reemplazando los datos se obtiene que:

$$4 \text{ gal} \cdot 26\% = Q_w \cdot 10\%$$

$$Q_w = 10,4 \text{ gal}$$

2.8.1 Tiempo de contacto

El tiempo de contacto que debe tener el regenerante con el lecho de resina debe estar en el rango de 2 a 4 BV/h (Bed Volume). La traducción de (Bed Volume) es el

volumen por hora de líquido a tratar / volumen de resina y existe una relación equivalente: “1ft³ posee 28lt/BV”. (Baruth, 1990)

Para este cálculo se toma el valor de 2 BV/h y se multiplica por la relación:

$$28 \frac{lt}{BV} \cdot 2 \frac{BV}{h} = 56 \frac{lt}{h} = 14,8 \frac{gal}{h}$$

Entonces el tiempo de contacto (t_c) se define por:

$$t_c = \frac{Q_w}{14,8 \frac{gal}{h}} \quad (2.9)$$

$$t_c = \frac{10,4 \frac{gal}{h}}{14,8 \frac{gal}{h}} = 0,70 h$$

$$t_c = 42,16 min$$

Con este tiempo se define el caudal de entrada del regenerante (Q_{rg}) de la siguiente manera:

$$Q_{rg} = \frac{Q_w}{t_c} \quad (2.10)$$

$$Q_{rg} = \frac{10,4 \frac{gal}{h}}{42,16 min} = 0,25 \frac{gal}{min}$$

2.9 Condiciones para el retrolavado

“El retro lavado se debe realizar por un lapso de 10 a 20 minutos dependiendo de la cantidad de impurezas que se hayan depositado en la resina” (Baruth, 1990), considerando que el agua a ser tratada proviene de la red potable se tomará un tiempo de 10 minutos para la duración de este ciclo.

“Las partículas de agua en el retro lavado deberán tener una velocidad de (V_l) de $15 \frac{m}{h}$ ”; (Baruth, 1990). El caudal de agua mínimo que deberá ser usado para el retro lavado (Q_{rl}) se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{rl} = 15 \frac{m}{h} \cdot A_s \quad (2.11)$$

Donde A_s = Área de sección transversal del tanque de intercambio

Al cambiar las unidades los datos se tiene que:

$$Q_{rl} = 50 \frac{ft}{h} \cdot 0,43 ft^2$$

$$Q_{rl} = 50 \frac{ft}{h} \cdot 0,43 ft^2$$

$$Q_{rl} = 2,7 \frac{gal}{min}$$

2.10 Condiciones para el enjuague

“Durante el ciclo de enjuague se debe mantener el mismo flujo del ciclo de servicio, y se deberá utilizar aproximadamente 25 galones de agua por cada pie cúbico de resina”; (Baruth, 1990). Con estos valores se calcula el tiempo de duración del ciclo de enjuague.

$$tc = \frac{25 \text{ gal}}{2 \frac{\text{gal}}{\text{min}}} = 12,5 \text{ min}$$

2.11 Cálculo del diámetro variando las consideraciones iniciales

Para realizar los cálculos de dimensionamiento del equipo, en algunos casos se asumió un valor para determinada variable como por ejemplo el volumen inicial de resina; después se realizaron los mismos cálculos variando el caudal y en otro caso el volumen de resina en la tabla No. 2.4 y tabla No. 2.5 se muestran los resultados.

| | | | | | | | CONDICIONES DE FLUJO | | | | | | | | | | |
|--------|-----|-----------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|-----|
| Caudal | gpm | Volumen de resina sup | ft ³ | Área de sección transversal | ft ² | Velocidad lineal | gpm/ft ² | Área de sección ideal | ft ² | Volumen ideal | ft ³ | Velocidad espacial | gpm/ft ³ | Volumen de resina calculado | ft ³ | Diámetro del tanque | plg |
| 0,5 | | 1 | | 0,435 | | 1,15 | | 0,0625 | | 0,144 | | 3,478 | | 0,25 | | 4,5 | |
| 0,6 | | 1 | | 0,435 | | 1,38 | | 0,075 | | 0,173 | | 3,478 | | 0,3 | | 4,9 | |
| 0,7 | | 1 | | 0,435 | | 1,61 | | 0,0875 | | 0,201 | | 3,478 | | 0,35 | | 5,3 | |
| 0,8 | | 1 | | 0,435 | | 1,84 | | 0,1 | | 0,230 | | 3,478 | | 0,4 | | 5,6 | |
| 0,9 | | 1 | | 0,435 | | 2,07 | | 0,1125 | | 0,259 | | 3,478 | | 0,45 | | 6,0 | |
| 1 | | 1 | | 0,435 | | 2,3 | | 0,125 | | 0,288 | | 3,478 | | 0,5 | | 6,3 | |
| 1,1 | | 1 | | 0,435 | | 2,53 | | 0,1375 | | 0,316 | | 3,478 | | 0,55 | | 6,6 | |
| 1,2 | | 1 | | 0,435 | | 2,76 | | 0,15 | | 0,345 | | 3,478 | | 0,6 | | 6,9 | |
| 1,3 | | 1 | | 0,435 | | 2,99 | | 0,1625 | | 0,374 | | 3,478 | | 0,65 | | 7,2 | |
| 1,4 | | 1 | | 0,435 | | 3,22 | | 0,175 | | 0,403 | | 3,478 | | 0,7 | | 7,5 | |
| 1,5 | | 1 | | 0,435 | | 3,45 | | 0,1875 | | 0,431 | | 3,478 | | 0,75 | | 7,7 | |
| 2 | | 1 | | 0,435 | | 4,6 | | 0,25 | | 0,575 | | 3,478 | | 1 | | 8,9 | |
| 2,5 | | 1 | | 0,435 | | 5,75 | | 0,3125 | | 0,719 | | 3,478 | | 1,25 | | 10,0 | |
| 3 | | 1 | | 0,435 | | 6,9 | | 0,375 | | 0,863 | | 3,478 | | 1,5 | | 10,9 | |
| 3,5 | | 1 | | 0,435 | | 8,05 | | 0,4375 | | 1,006 | | 3,478 | | 1,75 | | 11,8 | |
| 4 | | 1 | | 0,435 | | 9,2 | | 0,5 | | 1,150 | | 3,478 | | 2 | | 12,6 | |
| 4,5 | | 1 | | 0,435 | | 10,35 | | 0,5625 | | 1,294 | | 3,478 | | 2,25 | | 13,4 | |
| 5 | | 1 | | 0,435 | | 11,5 | | 0,625 | | 1,438 | | 3,478 | | 2,5 | | 14,1 | |

Tabla 2.4Cálculo del diámetro de tanques considerando diferentes caudales y un volumen inicial de resina de 1ft³

| | | | | | | | CONDICIONES DE FLUJO | | | | | | | | | | |
|--------|-----|-----------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|-----|
| Caudal | gpm | Volumen de resina sup | ft ³ | Área de sección transversal | ft ² | Velocidad lineal | gpm/ft ² | Área de sección ideal | ft ² | Volumen ideal | ft ³ | Velocidad espacial | gpm/ft ³ | Volumen de resina calculado | ft ³ | Diámetro del tanque | plg |
| 0,5 | | 0,1 | | 0,043 | | 11,5 | | 0,0625 | | 0,144 | | 3,478 | | 0,25 | | 4,5 | |
| 0,6 | | 0,2 | | 0,087 | | 6,9 | | 0,075 | | 0,173 | | 3,478 | | 0,3 | | 4,9 | |
| 0,7 | | 0,3 | | 0,130 | | 5,37 | | 0,0875 | | 0,201 | | 3,478 | | 0,35 | | 5,3 | |
| 0,8 | | 0,4 | | 0,174 | | 4,6 | | 0,1 | | 0,230 | | 3,478 | | 0,4 | | 5,6 | |
| 0,9 | | 0,5 | | 0,217 | | 4,14 | | 0,1125 | | 0,259 | | 3,478 | | 0,45 | | 6,0 | |
| 1 | | 0,6 | | 0,261 | | 3,83 | | 0,125 | | 0,288 | | 3,478 | | 0,5 | | 6,3 | |
| 1,1 | | 0,7 | | 0,304 | | 3,61 | | 0,1375 | | 0,316 | | 3,478 | | 0,55 | | 6,6 | |
| 1,2 | | 0,8 | | 0,348 | | 3,45 | | 0,15 | | 0,345 | | 3,478 | | 0,6 | | 6,9 | |
| 1,3 | | 0,9 | | 0,391 | | 3,32 | | 0,1625 | | 0,374 | | 3,478 | | 0,65 | | 7,2 | |
| 1,4 | | 1 | | 0,435 | | 3,22 | | 0,175 | | 0,403 | | 3,478 | | 0,7 | | 7,5 | |
| 1,5 | | 2 | | 0,870 | | 1,73 | | 0,1875 | | 0,431 | | 3,478 | | 0,75 | | 7,7 | |
| 2 | | 3 | | 1,304 | | 1,53 | | 0,25 | | 0,575 | | 3,478 | | 1 | | 8,9 | |
| 2,5 | | 4 | | 1,739 | | 1,44 | | 0,3125 | | 0,719 | | 3,478 | | 1,25 | | 10,0 | |
| 3 | | 5 | | 2,174 | | 1,38 | | 0,375 | | 0,863 | | 3,478 | | 1,5 | | 10,9 | |
| 3,5 | | 6 | | 2,609 | | 1,34 | | 0,4375 | | 1,006 | | 3,478 | | 1,75 | | 11,8 | |
| 4 | | 7 | | 3,043 | | 1,31 | | 0,5 | | 1,150 | | 3,478 | | 2 | | 12,6 | |
| 4,5 | | 8 | | 3,478 | | 1,29 | | 0,5625 | | 1,294 | | 3,478 | | 2,25 | | 13,4 | |
| 5 | | 9 | | 3,913 | | 1,28 | | 0,625 | | 1,438 | | 3,478 | | 2,5 | | 14,1 | |

Tabla 2.5 Cálculo del diámetro de tanques considerando diferentes caudales y diferentes volúmenes iniciales de resina

| | | | | | | | CONDICIONES DE FLUJO | | | | | | | | | | |
|--------|-----|-----------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|-----|
| Caudal | gpm | Volumen de resina sup | ft ³ | Área de sección transversal | ft ² | Velocidad lineal | gpm/ft ² | Área de sección ideal | ft ² | Volumen ideal | ft ³ | Velocidad espacial | gpm/ft ³ | Volumen de resina calculado | ft ³ | Diámetro del tanque | plg |
| 0,1 | | 0,1 | | 0,043 | | 2,3 | | 0,0125 | | 0,029 | | 3,478 | | 0,05 | | 2,0 | |
| 0,2 | | 0,2 | | 0,087 | | 2,3 | | 0,025 | | 0,058 | | 3,478 | | 0,1 | | 2,8 | |
| 0,3 | | 0,3 | | 0,130 | | 2,30 | | 0,0375 | | 0,086 | | 3,478 | | 0,15 | | 3,5 | |
| 0,4 | | 0,4 | | 0,174 | | 2,3 | | 0,05 | | 0,115 | | 3,478 | | 0,2 | | 4,0 | |
| 0,5 | | 0,5 | | 0,217 | | 2,3 | | 0,0625 | | 0,144 | | 3,478 | | 0,25 | | 4,5 | |
| 0,6 | | 0,6 | | 0,261 | | 2,30 | | 0,075 | | 0,173 | | 3,478 | | 0,3 | | 4,9 | |
| 0,7 | | 0,7 | | 0,304 | | 2,30 | | 0,0875 | | 0,201 | | 3,478 | | 0,35 | | 5,3 | |
| 0,8 | | 0,8 | | 0,348 | | 2,3 | | 0,1 | | 0,230 | | 3,478 | | 0,4 | | 5,6 | |
| 0,9 | | 0,9 | | 0,391 | | 2,30 | | 0,1125 | | 0,259 | | 3,478 | | 0,45 | | 6,0 | |
| 1 | | 1 | | 0,435 | | 2,3 | | 0,125 | | 0,288 | | 3,478 | | 0,5 | | 6,3 | |
| 1,1 | | 1,1 | | 0,478 | | 2,30 | | 0,1375 | | 0,316 | | 3,478 | | 0,55 | | 6,6 | |
| 1,2 | | 1,2 | | 0,522 | | 2,30 | | 0,15 | | 0,345 | | 3,478 | | 0,6 | | 6,9 | |
| 1,3 | | 1,3 | | 0,565 | | 2,30 | | 0,1625 | | 0,374 | | 3,478 | | 0,65 | | 7,2 | |
| 1,4 | | 1,4 | | 0,609 | | 2,3 | | 0,175 | | 0,403 | | 3,478 | | 0,7 | | 7,5 | |
| 1,5 | | 1,5 | | 0,652 | | 2,30 | | 0,1875 | | 0,431 | | 3,478 | | 0,75 | | 7,7 | |
| 1,6 | | 1,6 | | 0,696 | | 2,30 | | 0,2 | | 0,460 | | 3,478 | | 0,8 | | 8,0 | |
| 1,7 | | 1,7 | | 0,739 | | 2,30 | | 0,2125 | | 0,489 | | 3,478 | | 0,85 | | 8,2 | |
| 1,8 | | 1,8 | | 0,783 | | 2,30 | | 0,225 | | 0,518 | | 3,478 | | 0,9 | | 8,5 | |
| 1,9 | | 1,9 | | 0,826 | | 2,30 | | 0,2375 | | 0,546 | | 3,478 | | 0,95 | | 8,7 | |
| 2 | | 2 | | 0,870 | | 2,30 | | 0,25 | | 0,575 | | 3,478 | | 1 | | 8,9 | |

Tabla 2.6 Cálculo del diámetro de tanques considerando valores de caudal y volúmenes entre 0,1 y 2

2.12 Análisis

En la tabla 2.4 se muestran los resultados obtenidos para el volumen de resina y diámetro del tanque calculados con el método anteriormente descrito; como consideración inicial se tomó el valor de 1 ft³ de resina para todos los casos y se varió el caudal tomando como base 0.5 ft³. Inicialmente se resalta el resultado de dos filas mismas que se encuentran marcadas en color verde.

Como el valor de 1 ft³ de resina fue un valor de consideración, se repite los cálculos conservando los caudales y variando el volumen inicial; los resultados de este ejercicio se aprecian en la tabla 2.5.

Al realizar la comparación entre las tablas mencionadas se aprecia fácilmente que los resultados obtenidos para el volumen de resina y diámetro del tanque son iguales lo que significa que el valor que se toma para la consideración inicial de volumen de resina, solo es referencial y no influye sobre el resultado debido a que el área de sección es recalculado en función de parámetros establecidos para la velocidad lineal.

Se repitió el ejercicio variando el caudal y el volumen, los resultados se aprecian en la tabla 2.6

Los resultados de interés obtenidos en las tablas 2.4 y 2.5 se resumen en la tabla 2.7

| Consideraciones Iniciales | | Resultados obtenidos | |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Caudal (gpm) | Volumen (ft ³) | Volumen real (ft ³) | Diámetro tanque (plg) |
| 1 | 1 | 0,5 | 6,3 |
| 2 | 1 | 1,0 | 8,9 |
| 1 | 0,6 | 0,5 | 6,3 |
| 2 | 2 | 1,0 | 8,9 |

Tabla 2.7 Comparación de resultados

Si se dimensiona el ablandador de agua para que produzca 1 gpm el lecho de resina tendrá un volumen de $0,5 \text{ ft}^3$ y si se requiere que produzca 2 gpm el lecho de resina tendrá un volumen de 1 ft^3 .

Anteriormente se explicó que con un caudal de 2 gpm se podrá abastecer a los equipos de consumo continuo y almacenar agua para ser usada en los otros equipos y este sería el dimensionamiento adecuado; por otro lado existe la intención de que todos los recursos sean utilizados de manera eficiente y evitar al máximo desperdicios, por tales consideraciones el equipo se dimensionará para que produzca 2 gpm esto en función de que la cantidad mínima de resina se vende en presentaciones de 1 ft^3 .

2.13 Selección de tuberías

Una línea de conducción en un sistema de abastecimiento de agua potable se compone de tuberías, válvulas, accesorios, estructuras y obras para conducir el fluido desde la captación hasta el reservorio aprovechando toda la carga estática. “Debe utilizarse al máximo la energía disponible para conducir el gasto deseado, lo que en la mayoría de casos lleva a la selección del diámetro mínimo que permita presiones iguales o menores a la resistencia física que soporta el material”. (Cepes, 2013)

2.13.1 Criterios de diseño

Definido el perfil de la línea de conducción, es necesario considerar criterios de diseño en base a consideraciones como: Carga disponible, gasto de diseño, clase de tubería, diámetros, estructuras complementarias, línea de gradiente hidráulica, pérdidas de carga etc.

Para el cálculo de la pérdida de carga unitaria, pueden utilizarse muchas fórmulas, sin embargo una de las más usadas en conductos a presión, es la de Hazen y Williams. Esta fórmula es válida únicamente para tuberías de flujo turbulento, con comportamiento hidráulico rugoso y con diámetros mayores a 2 plg. Algunos autores recomiendan el empleo de la fórmula de Fair-Whipple

para diámetros menores a 2 plg.; sin embargo se puede utilizar la fórmula de Hazen y Williams, con cuya ecuación los fabricantes elaboran sus nomogramas en los que incluyen diámetros menores a 2 plg. (Streeter and Bedford, 1999)

2.13.2 Criterio de selección considerado para las tuberías del ablandador

Por las características del equipo no es posible considerar la carga disponible y gasto de diseño; en función de un caudal de 2 galones/ minuto para el cual se diseñó el equipo y la presión hidráulica existente en la red, considerando un factor de seguridad de 2, se decide utilizar tuberías de material PVC. Este material posee ventajas comparativas con relación a otro tipo de tuberías: es económico, flexible, durable, de poco peso y de fácil transporte e instalación; además, son las tuberías que incluyen diámetros comerciales menores de 2 plg y que fácilmente se encuentran en el mercado.

El diámetro de las tuberías se seleccionó considerando el criterio que busca obtener el menor ruido posible en las tuberías en función de las presiones y caudal de trabajo para lo cual se utilizó un nomograma el cual se presenta en el Anexo 4. Con este instrumento se determinó que la tubería de diámetro ½ plg cumple con las condiciones necesarias.

2.13.2.1 Tubería PVC de ½”

La denominación de tuberías PVC proviene del policloruro de vinilo, que es un polímero termoplástico. “Termoplástico” implica que a temperatura ambiente los materiales presentan características más rígidas que cuando la temperatura es aumentada.

Entre las principales ventajas se puede mencionar:

- Alta durabilidad
- Superficie interior lisa (reduce las pérdidas)
- Liviano y fácil de manejar

- Es muy versátil
- No se corroe
- Fácil de cortar y roscar o ensamblar accesorios pegables
- Soporta altas presiones.

2.14 Selección de válvulas y accesorios

La oferta en diseños y tipos de válvulas es muy amplia y ofrece múltiples posibilidades, por lo cual se debe seguir una secuencia lógica de parámetros para su selección. Naturalmente estos parámetros estarán influenciados por factores ajenos al aspecto técnico tales como la disponibilidad, o economía.

La primera base de selección se basará en la función que tendrá la válvula; para ello se identifican las siguientes funciones:

Aislamiento.- Interrumpe el flujo de la línea de forma total

Retención.- Impide que el flujo retroceda

Regulación.- Permite modificar la cantidad de flujo

Seguridad.- Protege equipos y personas de sobre presiones. (Comeval, 2007)

El siguiente factor a considerar es la presión de diseño, del cual se derivará los materiales constructivos apropiados. Con estas consideraciones los elementos seleccionados son los siguientes:

2.14.1 Válvulas de bola compactas

- Excelentes características de flujo
- No se corroe y no hay desgaste
- Cierre de ¼ de vuelta
- Presión máxima de trabajo: 235 Psi A 23 °C
- Rosca NPT
- Cierre rápido

Este tipo de válvula es la más apropiada para controlar los procesos que realiza el ablandador ya que son de fácil apertura, durables y económicas, se las puede apreciar en la figura 2.4



Figura 2.4 Válvula de bola SCH 80
Fuente: Coval, 2013

2.14.2 Accesorios de polipropileno (PP)

- Elementos 100% polipropileno monocapa
- Alta resistencia a la presión y a temperaturas extremas
- Sistemas livianos y flexibles
- Fácil y rápida instalación
- Amplia gama con diámetros que van de ½ a 2"



Figura 2.5 Accesorios en polipropileno
Fuente: Plastigama, 2014

2.14.3 Accesorios pagables de PVCP

- Elementos fabricados en PVC (Policloruro de vinilo)
- Este material garantiza la conservación de la calidad del agua
- Son fabricados bajo las normas NTC 382
- Instalación rápida y sencilla
- Dependiendo la clasificación pueden soportar presiones hasta de 500 PSI
- Resistencia a la corrosión interna



Figura 2.6 Accesorios PVCP
Fuente: Coval, 2013

2.14.4 Válvula de compuerta 200 wog

- Son construidas en bronce
- El mecanismo de cierre es una compuerta plana
- Permite reducir el flujo de forma gradual
- Son fabricadas de acuerdo a MSS-SP-80, en clases de presión 125 (200 wog)

En el sistema se usarán dos válvulas de este tipo ya que permiten regular el flujo del fluido con mucha facilidad.



Figura 2.7 Válvula de compuerta
Fuente: Roma.cl, 2013

2.14.5 Manómetros de presión

Para la selección de manómetros de presión es importante tener en cuenta los siguientes factores:

- Composición del fluido
- Temperatura del fluido
- Condiciones ambientales
- Rangos de presión

Generalmente se selecciona un rango de presión dos veces a la presión de trabajo. La presión de trabajo en todos los casos debe limitarse a 75 % del rango del manómetro. Donde se encuentra presión y pulsación alternantes, la presión de trabajo se debe limitar 2/3 el rango del manómetro.



Figura 2.8 Manómetro de presión
Fuente: Ferrovimar, 2014

2.15 Conclusiones capítulo 2

- Para conseguir un diseño funcional del equipo se debe considerar los parámetros establecidos de velocidad lineal y velocidad espacial en los cálculos con eso se garantiza que el agua atravesará la cama de resina a la velocidad adecuada con lo cual se garantiza el intercambio de iones entre el agua y la resina.
- El valor que se tomó para la consideración inicial de volumen de resina, solo es referencial y no influye sobre el resultado debido a que el área de sección es recalculado en función de parámetros establecidos para la velocidad lineal.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ABLANDADOR

3.1 Introducción

En este capítulo se presentará los registros de valores y lecturas de las principales variables de interés tomadas durante el funcionamiento del equipo como son los valores de presión registrados tanto en el manómetro de entrada como en la salida para de esta manera analizar que sucede con el delta P en el tiempo.

Se analizarán los valores de dureza obtenidos en las diferentes muestras tomadas con el caudal de diseño y con un caudal superior y se compararán los índices obtenidos con los planteados en los objetivos. Mediante el uso de gráficos se analizará el comportamiento de las principales variables del equipo para determinar la estabilidad del mismo y poder predecir comportamientos futuros.

Se establecerán parámetros de funcionamiento para todos los procesos, como tiempos de funcionamiento, frecuencia de regeneración, tiempos de contacto, flujos necesarios.

Mediante un diagrama de flujo se representará el proceso de construcción del equipo.

3.2 Instalación y toma de lecturas

Se realizó la instalación del ablandador de agua en el laboratorio de termofluidos, la entrada de agua al equipo se conectó desde una acometida de agua potable que presentó las siguientes características iniciales:

Presión en la red = 60 PSI, Caudal Neto = 3.7 gl/min, Dureza = 4 granos/galón

El equipo fue diseñado para producir 2 gal/min de agua blanda, para lo cual se restringe el flujo a la salida del equipo mediante el uso de una válvula de compuerta;

una vez puesto en marcha se procedió a tomar datos mismos que se muestran en la tabla 3.1:

| Presión de entrada (PSI) | Presión de salida (PSI) | ΔP (PSI) | Lectura medidor (m^3) | ΔV (litros) | Galones tratados | Dureza (granos/gl) |
|--------------------------|-------------------------|------------------|---------------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| | | | | 0 | 0 | 4 |
| 44 | 41 | 3 | 23,823 | 26 | 6,9 | 0 |
| 46 | 42 | 4 | 23,849 | 59 | 15,7 | 0 |
| 46 | 43 | 3 | 23,882 | 166 | 44,3 | 0 |
| 44 | 41 | 3 | 23,989 | 229 | 61,1 | 0 |
| 50 | 47 | 3 | 24,052 | 302 | 80,5 | 0 |
| 49 | 46 | 3 | 24,125 | 388 | 103,5 | 0 |
| 48 | 45 | 3 | 24,211 | 452 | 120,5 | 0 |
| 47 | 43 | 4 | 24,275 | 522 | 139,2 | 0 |
| 45 | 42 | 3 | 24,345 | 593 | 158,1 | 0 |
| 45 | 42 | 3 | 24,416 | 666 | 177,6 | 0 |
| 46 | 43 | 3 | 24,489 | 727 | 193,9 | 0 |
| 45 | 42 | 3 | 24,55 | 804 | 214,4 | 0 |
| 47 | 44 | 3 | 24,627 | 880 | 234,7 | 0 |
| 50 | 47 | 3 | 24,703 | 1089 | 290,4 | 0 |
| 48 | 45 | 3 | 24,912 | | | |

Figura 3.1 Datos obtenidos durante el proceso de ablandamiento

3.3 Caída de presión

Una de las variables importantes que se debe controlar en el diseño, es la caída de presión que ocurre dentro del tanque de intercambio iónico; en la parte de diseño se indicó que este valor no debe ser mayor al 7% esto con el fin de mantener buenos niveles de eficiencia (m^3)

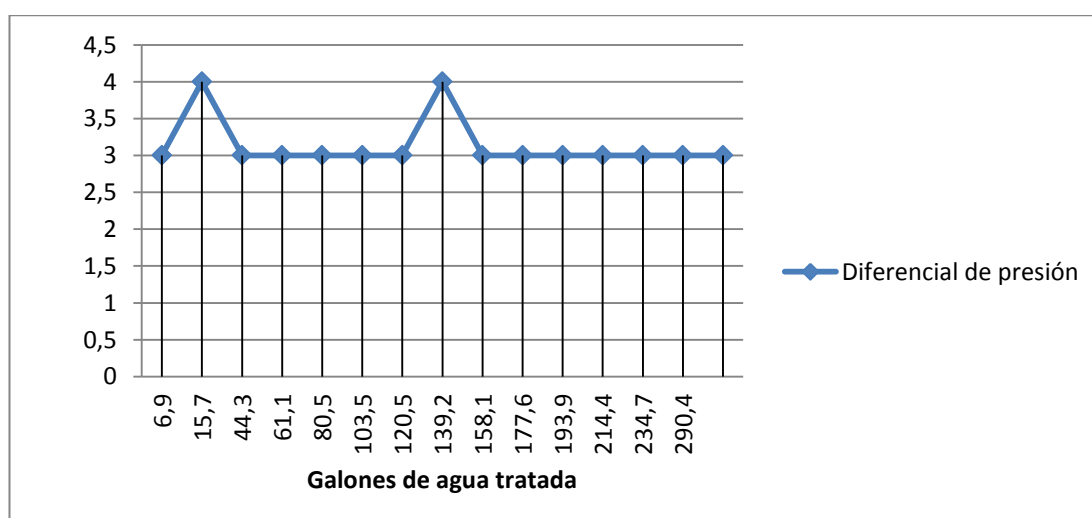


Figura 3.2 Comportamiento del diferencial de presión; caudal 2 gpm

En la figura 3.1 se puede observar que durante el proceso de prueba la diferencia de presión se mantuvo bastante estable y se registró la tendencia a un valor de 3 PSI que es equivalente a 6% de pérdida, lo que significa que el equipo está dentro de un rango de diseño eficiente.

3.4 Nivel de dureza obtenida

Para cuantificar la dureza que posee el agua se utilizó un kit denominado “Hardness Test Kit 5B” de la marca HACH que consiste en un reactivo químico y una solución tituladora.

Al analizar las muestras de agua dura tomadas directamente de la acometida de agua potable en el laboratorio de termofluidos, se pudo determinar que el agua posee una dureza de 4 granos/galón.

En la figura 3.3 se muestran los resultados de dureza obtenidos para diferentes volúmenes de agua tratada por el equipo:

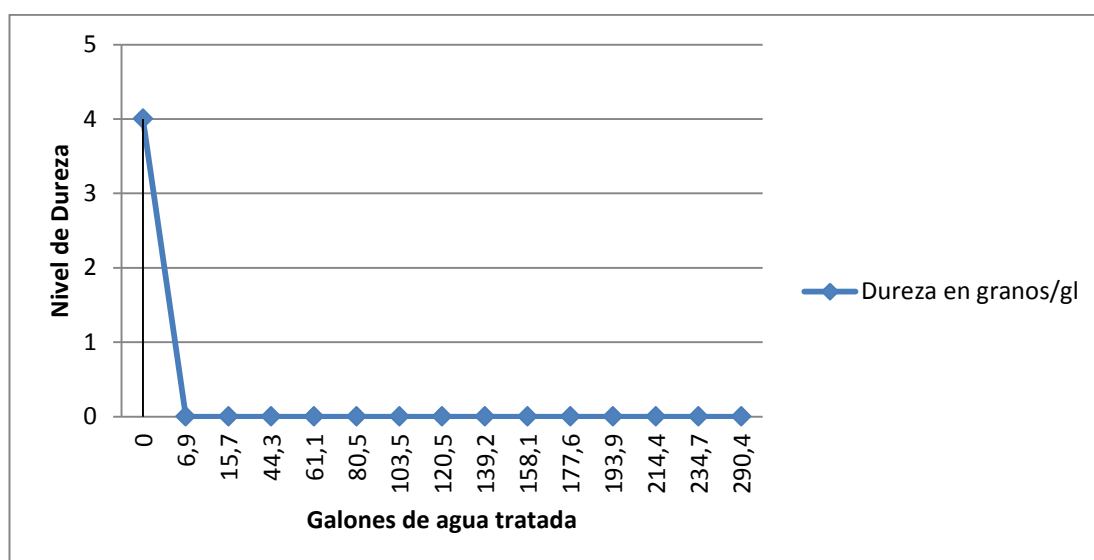


Figura 3.3 Comportamiento de la dureza; caudal 2 gpm

En la figura 3.3 se observa que cada prueba de dureza que se realizó para los diferentes volúmenes de agua se obtuvo como resultado un valor de cero; esto muestra un buen funcionamiento y comportamiento estable del equipo.

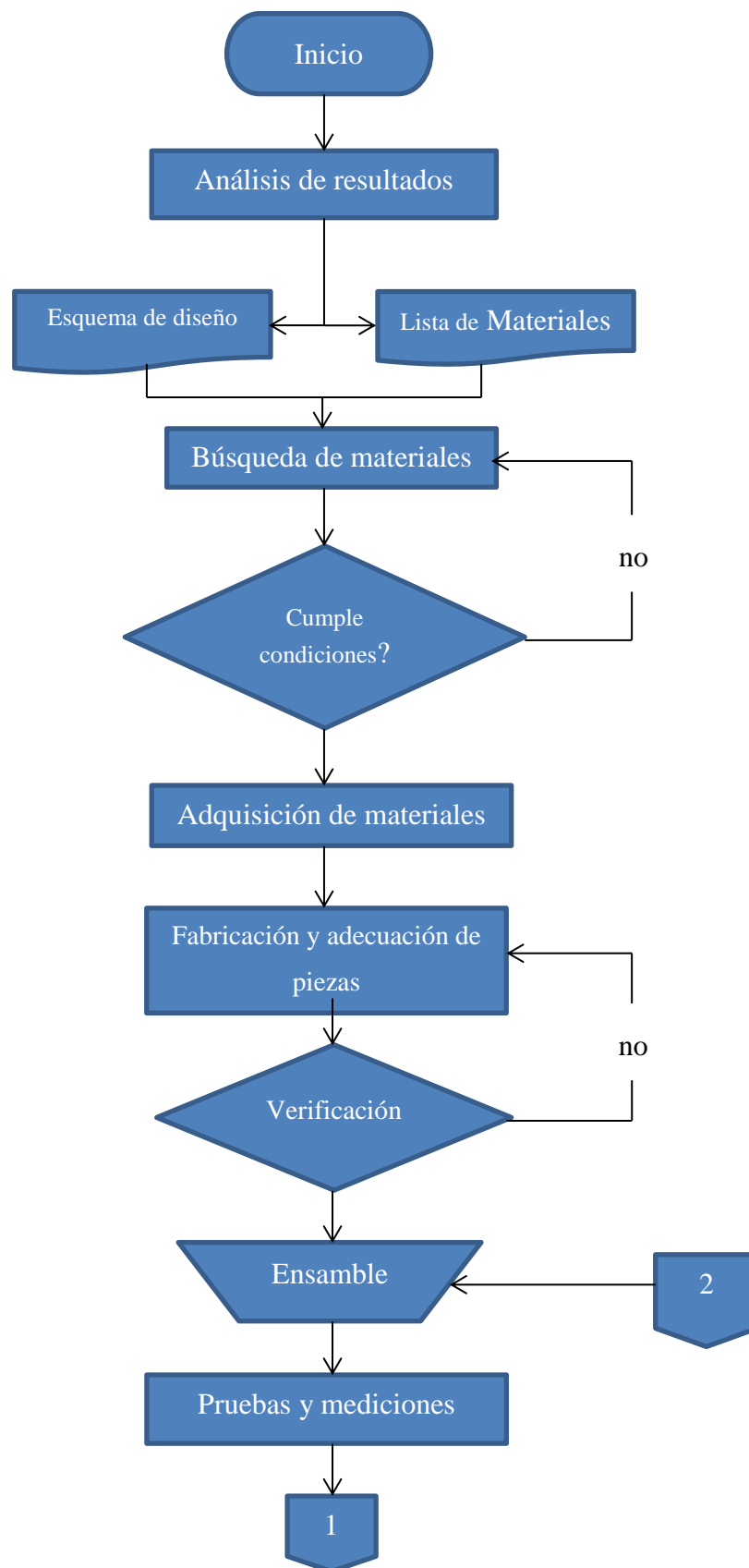
3.5 Frecuencia de regeneración

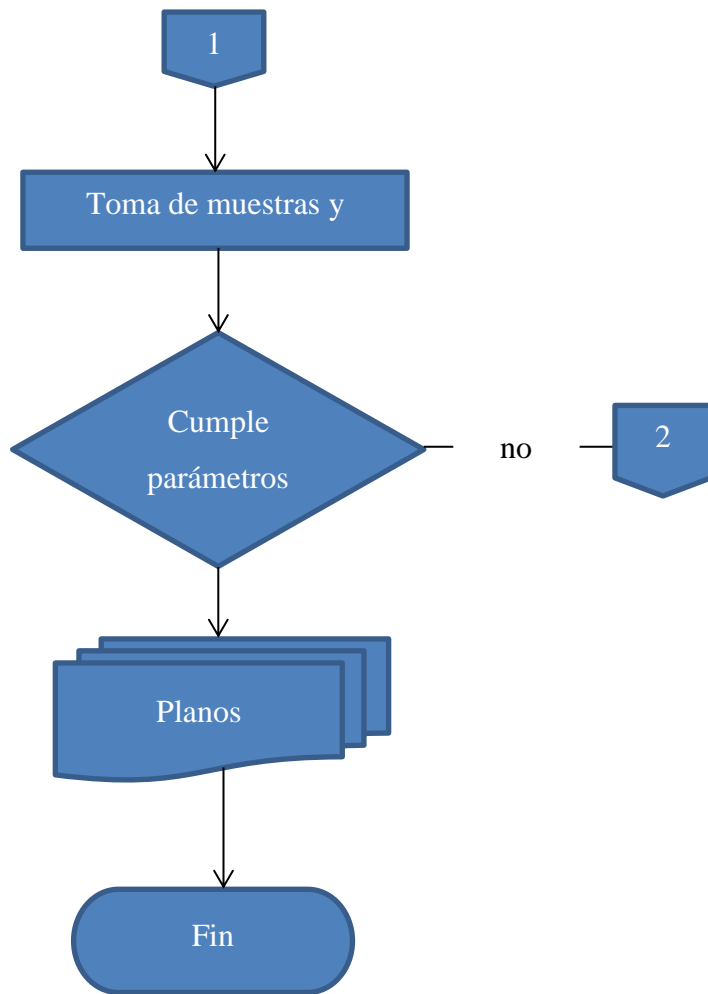
Debido a que el ablandador de agua no funcionará de manera continua, no se recomienda considerar el número de días de uso para la regeneración y tampoco el volumen de agua procesada. Un pie cúbico de resina tiene 25 000 granos, si el agua tiene una dureza registrada de 4 granos /galón y considerando el factor de seguridad de 1,25 en condiciones de funcionamiento continuas se determina que el pie cúbico de resina puede ablandar 5 000 galones de agua lo cual equivale a 18,9 metros cúbicos de agua.

Sin embargo si el equipo no es puesto en funcionamiento con frecuencia se deberá tener las siguientes precauciones:

- Se deberá desaguar o cambiar el agua almacenada en el tanque de intercambio cada 3 días para evitar la descomposición del agua (putrefacción).
- Si determinada cantidad de agua permanece mucho tiempo en contacto con la resina, una vez que se han intercambiado todos los iones de calcio y magnesio, la resina empezará a capturar también iones de hierro; esto puede ser perjudicial para la vida útil de la resina, para garantizar que eso no suceda se deberá realizar el proceso de regeneración cada 15 días, esto con el objeto de mantener en buenas condiciones la resina de intercambio iónico.

3.6 Diagrama de flujo del proceso de construcción





3.7 Fotografía del ablandador terminado



CAPÍTULO 4

COSTOS

4.1 Costos directos

| ITEM | DESCRIPCIÓN | CANTIDAD | V. UNIT | V. TOTAL |
|------|--|----------|--------------|----------------|
| 1 | INTERNO TQ-BOQ FONDO FALSO RAN 0,2 MM | 2 | 17,5 | 35 |
| 2 | ANILLO DE EXPANSIÓN DB50,28/8-12 | 2 | 17,5 | 35 |
| 3 | ADAP MM PVCP 1/2 (21mm) | 30 | 0,28 | 8,4 |
| 4 | CODO PVCP 1/2 x 90 (21mm) | 12 | 0,39 | 4,68 |
| 5 | VAL. COMPUERTA DECA 1/2 | 2 | 11,5 | 23 |
| 6 | ADAPTADOR TANQUE PLMX 1 1/4 | 2 | 5,73 | 11,46 |
| 7 | BUSH POLIMEX 1 1/4 x 1/2 | 2 | 1,31 | 2,62 |
| 8 | TAPON HH PVCP 200mm | 2 | 36,6 | 73,2 |
| 9 | UNIVERSAL POLIMEX 1/2 | 6 | 1,5 | 9 |
| 10 | MANOMETRO DE 0-160 | 2 | 4,5 | 9 |
| 11 | TEE POLIMEX 1/2 | 6 | 0,58 | 3,48 |
| 12 | BUSH HG 1/2 x 1/4 CHINO | 2 | 0,29 | 0,58 |
| 13 | EMPAQUE CIEGO | 1 | 0,12 | 0,12 |
| 14 | EMPAQUE PLANO | 1 | 0,4 | 0,4 |
| 15 | ADAPTADOR TANQUE PLMX 2 | 2 | 10,69 | 21,38 |
| 16 | BUSH PLIMEX 2- 1/2 | 2 | 3,15 | 6,3 |
| 17 | ADAPTADOR FLEX 12 x 1/2 MACHO | 5 | 0,49 | 2,45 |
| 18 | VALVULA 12 mm FLEX M/VERDE SIP | 2 | 1,084 | 2,168 |
| 19 | KIT ASPIRACIÓN P/ 3/4" | 1 | 16,02 | 16,02 |
| 20 | TEE FLEX 12 MM | 3 | 0,493 | 1,479 |
| 21 | VALVULA 1/2" ROSC M/AZUL | 9 | 2,057 | 18,513 |
| 22 | VALVULA 16 MM FLEX M/VERDE SIP | 2 | 0,94 | 1,88 |
| 23 | TEE 1/2 PVCP | 10 | 0,45 | 4,5 |
| 24 | TUBO 200 MM 1,6MPa (1,50m) | 1 | 40 | 40 |
| 25 | MANGUERA 8MM | 8 | 0,15 | 1,2 |
| 26 | POP-UP HUNTER BOQUILLA 10-A | 1 | 2,05 | 2,05 |
| 27 | ABRAZAD GALV 14-16 MM JET | 8 | 0,4 | 3,2 |
| 28 | RESINA CATIONICA FUERTE 1ft | 1 | 160 | 160 |
| 29 | KIT PARA ANALISIS DE DUREZA | 1 | 40 | 40 |
| 30 | VALVULA ESFER CONEXIÓN H-H | 3 | 3,58 | 10,74 |
| 31 | MANGUERA 1/2" | 5 | 0,88 | 4,4 |
| 32 | CODO POLIMEX ROSCADO 1/2 | 15 | 0,38 | 5,7 |
| 33 | NEPLOS 6 | 4 | 0,42 | 1,68 |
| 34 | NEPLO CORRIDO | 8 | 0,35 | 2,8 |
| 35 | GARRUCHAS | 2 | 7,6 | 15,2 |
| 36 | O RING | 2 | 1 | 2 |
| 37 | REGATONES | 2 | 1 | 2 |
| 38 | TANQUE 10 GALONES | 1 | 10 | 10 |
| 39 | ESTRUCTURA SOPORTE FABRICADA EN CHAPA METALICA DE 4mm Y TUBO REDONDO | 1 | 120 | 120 |
| 40 | MECANIZADO DE BUJE SUPERIOR EN NYLON | 1 | 15 | 15 |
| 41 | MECANIZADO DE BUJE INFERIOR EN NILON | 1 | 10 | 10 |
| 42 | MECANIZADO DE INYECTOR VENTURI FORMADO DE TRES CUERPOS | 1 | 30 | 30 |
| | | | | 766,6 |
| | | | IVA | 91,99 |
| | | | TOTAL | 858,592 |

4.2 Costos indirectos

| ITEM | DESCRIPCIÓN | CANTIDAD | V. UNIT | V. TOTAL |
|------|---------------------------|----------|--------------|---------------|
| 1 | SOLDADURA CPVC 4 ONZAS | 2 | 6,221 | 12,442 |
| 2 | TEFLON ALEMAN SHECOMEX R | 6 | 0,51 | 3,06 |
| 3 | PEGA AMERICANA 705 1/32 | 2 | 3,34 | 6,68 |
| 4 | PINTURA BLANCA | 1 | 15 | 15 |
| 5 | PINTURA GRIS | 1 | 6 | 6 |
| 6 | PINTURA NEGRA | 1 | 6 | 6 |
| 7 | TRANSPORTE Y MOVILIZACIÓN | 1 | 50 | 50 |
| | | | TOTAL | 99,182 |

CONCLUSIONES

- El valor que se tomó como consideración inicial de volumen de resina para el inicio los cálculos, solo fue referencial y no influyó sobre el resultado final debido a que el área de sección fue recalculada en función de parámetros establecidos para la velocidad lineal con la que debe cumplir el diseño.
- El ablandador que fue construido funciona correctamente, proporciona dos galones por minuto con un valor de dureza de cero granos por galón, con lo cual superó el rango de dureza que se planteó en una de las hipótesis iniciales.
- Uno de los objetivos planteados fue lograr que el equipo tenga una caída de presión menor o igual a un 7% entre la entrada y la salida del tanque de resina; durante el proceso de ablandamiento del agua se registró una caída de presión que está en el rango del 6 al 7%, estos valores colocan al equipo dentro de los rangos que debe tener un diseño óptimo.
- Se determinó que durante el proceso de regeneración se debe introducir al tanque de intercambio un volumen de salmuera de 10,4 galones con una concentración del 10% a una tasa de 1 galón/minuto, esto se logra mediante el empleo de un inyector Venturi que aporta con el 60% de flujo motriz (agua de red) y el 40% de sal muera con una concentración del 26%, es succionado por el efecto Venturi desde un depósito. Debido a que el flujo motriz es bastante pequeño, la columna de agua que es succionada no debe superar los 70 cm de altura y el ingreso del fluido al tanque de intercambio debe realizarse a presión atmosférica.
- El tanque de intercambio, el sistema de válvulas y tuberías del equipo pudieron ser contruidos utilizando elementos fabricados en PVP y polímeros debido a que cuentan con características apropiadas para el manejo de caudales y presiones de operación son bajos; el equipo está diseñado para soportar una presión máxima de 120 PSI.

- La investigación mostró que incrustaciones que se forman en los tubos de una caldera a causa de las calcificaciones si reducen la eficiencia de las mismas, algunos expertos sostienen que una acumulación de incrustaciones de 3 milímetros de espesor en las paredes de los tubos de las calderas reducirá la eficiencia en un 30% lo que finalmente se reflejará en costos de operación.

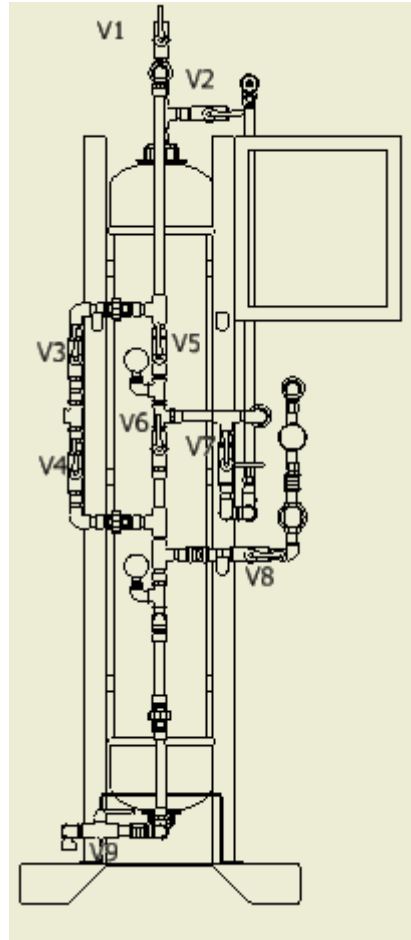
RECOMENDACIONES

- El tanque donde se almacenará el agua blanda es muy pequeño y está un poco deteriorado por lo cual se debería implementar otro tanque de mayor tamaño que posea una válvula adicional para obtener el agua que será usada en los equipos de volumen fijo.
- Para un correcto funcionamiento del ablandador se requiere que exista un desagüe o drenaje a nivel del piso, y el único existente se encuentra elevado a aproximadamente 60 cm lo cual hace imposible desfogar el agua por gravedad, por lo cual se debe implementar otro drenaje o acondicionar el existente para que cumpla la condición.
- Durante los ciclos de trabajo del equipo se debe tener la precaución que las válvulas se encuentren en las posiciones correctas para cada proceso según lo indica el manual de uso, con eso se garantizará el buen funcionamiento del equipo.
- Debido a las condiciones de uso de no frecuente del ablandador se recomienda cambiar el agua almacenada en el tanque de resina cada tres días y regenerar el equipo cada 15 días esto con el fin de evitar que la resina se cubra de cationes de hierro, lo cual podría dañar la resina.
- Si se desagüa el equipo por alguna razón, nunca se deje a la resina sin agua por periodos mayores de 24 horas ya que se fracturará y perderá sus propiedades.
- La resina de intercambio es Purolite C100 E y deberá ser sustituida después de tres años.

LISTA DE REFERENCIAS

- Anthony (2009). Marlo incorporated. Recuperado el 26 de octubre de 2014 de: <http://www.malo-inc.com>
- Avila, J (1999). Lo esencial del intercambio iónico. Recuperado el 1 de agosto de 2014 de: <http://www.agualatinoamerica.com>.
- Baruth, E (1990). Water treatment plant desing. USA. McGraw-Hill.
- Behn, A (1993). Tratamiento de agua para calderas. Chile. Thermal engineering.
- Blanco, B (1994). La descalcificación del agua por resinas intercambiadoras de iones. España. Astramatic.
- Bornak, W (1992). Ion Exchange deionization for industrial users. USA. Tall OAKS PUBLISHING INC.
- Comeval (2007). Comeval. Recuperado el 26 de febrero de 2015 de: http://www.comeval.es/formación_criterios_2007_hm.
- Owens, D (1995). Practical principles of ion Exchange wáter treatment. USA. Tall OAKS PUBLISHING INC.
- Rohn and Hass Company (1988). Ion Exchange in water treatment. USA
- Streeter, D and Bedford, E (1999). Mecánica de fluidos. Colombia. McGraw-Hill.
- McNulty, J (1983). Sulfate and Choride Kinetics versus practical size for gel and MR anion resins. Los Angeles CA. EPRT.
- Applebaum, S (1968). Demineralization by Ion Exchange. USA. Academic Press.
- Arden,P (1968). Water purifications by Ion Exchange. USA. Plenum Press.
- Calmon, C; Kressman, T (1957). Ion Exchangers in Organics an Biochemistry. USA.
- Helffrich, F (1962). Ion Exchange, New York NY. McGraw Hill.
- Nachod, F (1956). Ion Exchange Technology. New York NY. Academic Press.
- Osborn, G.H (1958). Synthetic Ion Exchangers. USA. McMillan.

Anexo 1 MANUAL DE OPERACIÓN

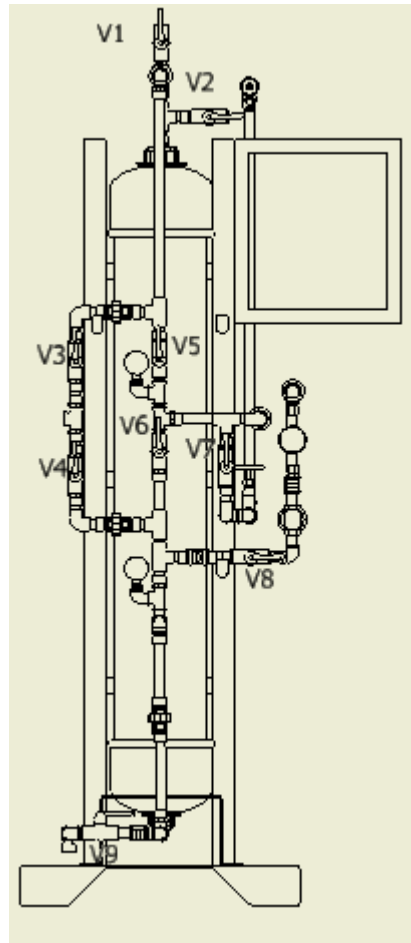


CICLO DE OPERACIÓN.- es el ciclo en el cual entra agua dura y sale agua blanda, las válvulas que deben abrirse son: V5 y V8

| V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 |
|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|
| off | off | off | off | ON | off | off | ON | off |

CICLO DE RETROLAVADO.- Este ciclo sirve para descomprimir la resina y quitar suciedades, las válvulas que deben abrirse son: V6 y V3.

| V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 |
|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| off | off | ON | off | off | ON | off | off | off |



CICLO DE REGENERACIÓN.- este ciclo se realiza cuando la resina se encuentra saturada y ya no quita la dureza del agua para este proceso se realiza lo siguiente

PASO 1.- verificar que todas las válvulas estén cerradas

PASO 2.- abrir V9, esperar 1 minuto y abra V1 (dejar las dos abiertas)

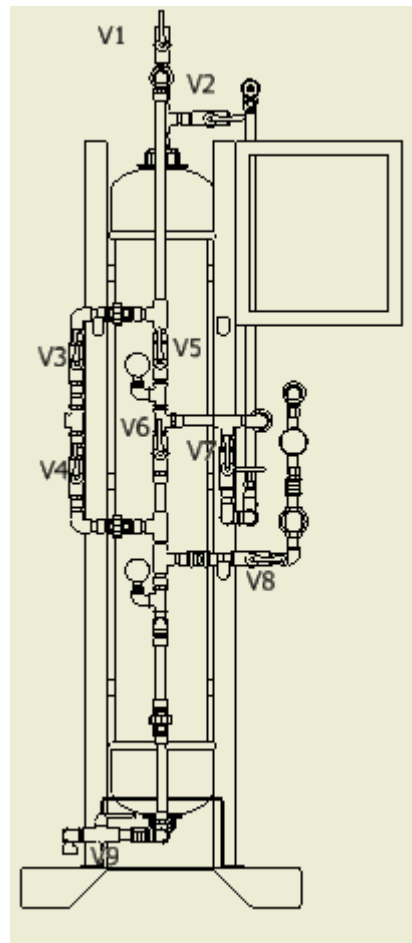
PASO 3.- abrir V7, esperar 20 segundos y abra V2 (dejar abiertas)

El tanque descargara al drenaje a nivel de piso 1 galón / minuto y al mismo tiempo ingresará salmuera a la misma relación 1galon/minuto proceso dura 45 minutos

| V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 |
|----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|
| ON | ON | off | off | off | off | ON | off | ON |

DESPUES DE 45 MINUTOS CIERRAR EN ESTE ORDEN: V7, V2, V9, V1

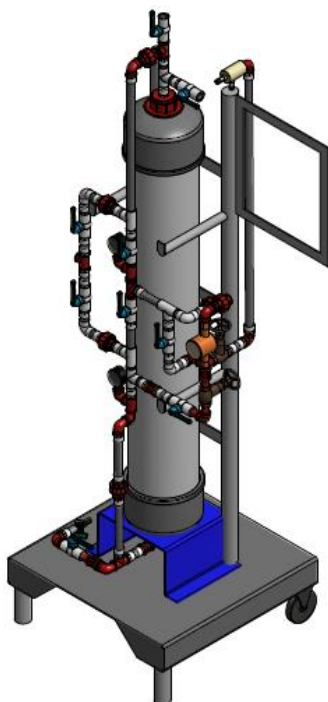
CICLO DE LAVADO.- es para eliminar los residuos de sal muera, para este proceso se abren las válvulas V5 y V4.



| V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| off | off | off | ON | ON | off | off | off | off |

Este proceso debe durar aproximadamente 15 minutos y l equipo estará listo para iniciar el ciclo de ablandamiento.

Anexo 2 MANUAL DE MANTENIMIENTO



1.- Se debe reemplazar el agua del tanque de intercambio cada tres días, especialmente si el equipo no trabaja en forma continua; este procedimiento se lo puede hacer poniendo el equipo en ciclo de servicio o en ciclo de retro lavado por un lapso de 10 minutos, esto evitara que el agua almacenada entre en un proceso de putrefacción o descomposición.

2.- Cada quince días se debe realizar el proceso de regeneración, con el objeto de preservar el equipo y extender la vida útil de la resina ya que cuando el equipo está inactivo, la resina toma los cationes de hierro que se encuentran presentes en el agua retenida en el tanque de intercambio.

3.- Cada vez que el equipo no esté funcionando es necesario eliminar la presión interna, esto se logra abriendo lentamente alguna de las válvulas de desfogue durante unos pocos segundos (V3, V4 o V9)

4.- La resina de intercambio deberá ser reemplazada en el lapso de un año, para realizar este procedimiento es necesario:

- Cortar el suministro de agua hacia el equipo y desconectar las universales que unen al equipo con las tuberías de entrada y salida.
- Desaguar el tanque (abrir válvulas V9 y V1)

- Desconectar la universal superior y la universal inferior que unen el circuito de válvulas al tanque de intercambio y retirar con precaución.
- Desconectar la manguera de conexión del Venturi a la válvula V2.
- Desconectar la tubería inferior del tanque para que este libre
- Quitar el bushin de 2" ubicado en la parte superior del tanque.
- Extraer el buje con el distribuidor.

Una vez retirado esto se debe quitar la abrazadera metálica y voltear el tanque y sacudir para lograr que toda la resina y grava salga; por el peso del tanque se recomienda hacerlo entre dos personas.

- Colocar el tanque en la estructura y asegurarlo.
- Colocar los acoples de tubería inferiores
- Cargar el tanque con la nueva resina y grava por el orificio superior; no colocar más de 1ft³ de resina.
- Lavar a presión el distribuidor para destapar las micro rejillas
- Volver a conectar todas las tuberías, accesorios y sistema de válvulas
- Presurizar el tanque y verificar que no existan fugas.
- Realizar el ciclo de retro lavado por 10 minutos para lograr que la grava se ordene debajo de la resina y se elimine cualquier impureza que pudo haber ingresado.

Anexo 3 FICHA TÉCNICA RESINA



PUROLITE C-100 E

RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO FUERTEMENTE ÁCIDA
(PARA USAR EN LA DESCALCIFICACIÓN DEL AGUA)

HOJA TÉCNICA

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

PUROLITE C-100 E es una resina catiónica de poliestireno sulfonado tipo gel, de elevada pureza, diseñada especialmente para el tratamiento de alimentos, bebidas, aguas potables, y agua empleada en la manipulación de alimentos.

C 100 E cumple con la normativa de la U.S. Food and Drug Administration sección 21, párrafo 173.25 sobre empleo de resinas en el tratamiento de alimentos para el consumo humano.

C 100 E está inscrita en el Registro General Sanitario de Alimentos del Ministerio de Sanidad y Consumo, con el Nº 31.01108/B-11046, para el tratamiento de aguas potables.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

| | |
|---|---|
| Estructura del polímero | poliestireno reticulado con DVB |
| Forma física y aspecto | perlas esféricas transparentes |
| Grupo funcional | Poliestireno sulfonado |
| Forma de suministro | Na ⁺ |
| Densidad aparente (aprox.) | 800-840 g/l (50-52.5 lb/ft ³) |
| Tamaño de malla, U.S. estándar Mesh (húmeda) | 16-50 |
| Rango tamaño de partícula | 1.2 mm < 5% - 0.3 mm < 1% |
| Retención humedad, forma Na ⁺ | 46-50% |
| Hinchamiento, Ca ²⁺ → Na ⁺ (max.) | +8% |
| Densidad forma Na ⁺ (húmeda) | 1.27 |
| Capacidad total, forma Na ⁺ , húmeda (min.) | 1.9 eq/l |
| Temperatura de trabajo, forma Na ⁺ (max.) | 140°C (285°F) |
| Rango estabilidad pH | 0 - 14 |
| Rango operativo pH, cido Na ⁺ | 6 - 10 |

CONDICIONES DE TRABAJO ESTÁNDAR (DESCALCIFICACIÓN EN CO - CORRIENTE)

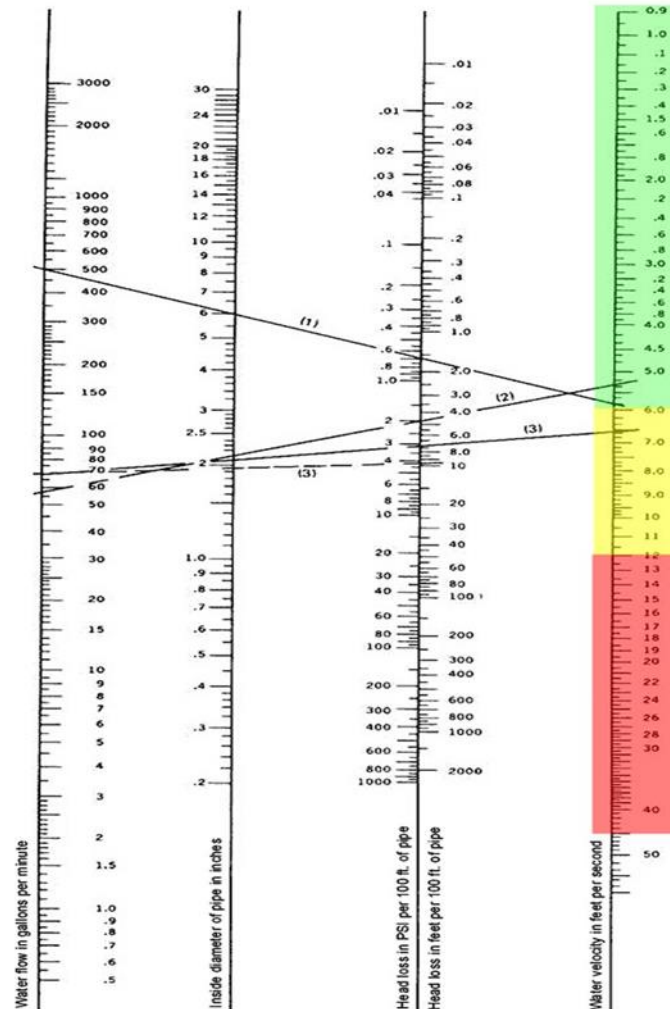
| OPERACION | CAUDAL | DISOLUCION | MINUTOS | CANTIDAD |
|----------------|------------|--------------|-------------|--------------|
| Servicio | 8- 40 BV/h | Agua entrada | | |
| Contralavado | 7 - 12 m/h | Agua entrada | 5 - 20 | 1,5 - 4 BV |
| Regeneración | 2 - 7 BV/h | 8 - 20% NaCl | 15 - 60 | 60 - 320 g/l |
| Lavado (lento) | 2 - 7 BV/h | Agua entrada | 30 (aprox.) | 2 - 4 BV |
| Lavado rápido) | 8- 40 BV/h | Agua entrada | | 3 - 10 BV |

1 BV = 1 Volumen/Volumen resina

Anexo 4 NOMOGRAMA

How to select the right pipe size for your application.

Find your flow in the first column (GPM) and then select the pipe size you want in the second column (pipe, ID in inches.) Draw a straight line between them all the way to the last column. If the line ends up in the green you are good. If it ends in the yellow or red, increase the pipe size until your line ends in the green (best) or yellow (just okay) area.



You should size your pipe so that your flow velocity stays in the green or yellow range. The green range is safest, most efficient and will produce little to no noise. Flow velocities in the yellow range may be noisy and have additional back pressure. Flow velocities in the red are not recommended because of the risk of hydraulic shock and pipe/fitting/joint & pump failure.

Note: Back pressure (restriction) is exponentially dependent on flow velocity. For example in a 1" pipe going from a flow velocity of 2 ft/sec (about 5gpm) to a flow velocity of 3.86 ft/sec (about 10gpm) will increase back pressure by 300%. Going to a flow velocity of 7.71ft/sec (about 20gpm) will increase back pressure by 1300%!

These figures are for straight pipe only! The effect of putting direction changes in will compound the back pressure even more and could even result in failure of the system or burning up the pump. You will never be hurt by going to a bigger pipe and will gain by using less electricity due to a more efficient system which may offset the initial price difference for the larger pipe.

Nomograph courtesy of Plastics Pipe Institute, a division of The Society of The Plastics Industry.

Text & Color Coding Copyright Flexpvc.com (2013)

Anexo 5 FOTOGRAFÍAS DE PARTES Y PROCESO CONSTRUCTIVO



Perforación de tapones



Buje superior



Distribuidor



Unión tanque con buje inferior



Tapón inferior con colector



Tuberías y accesorios



Resina catiónica fuerte C100



Grava



Colocación de resina



Colocación distribuidor y buje superior



Empaques



Manómetro

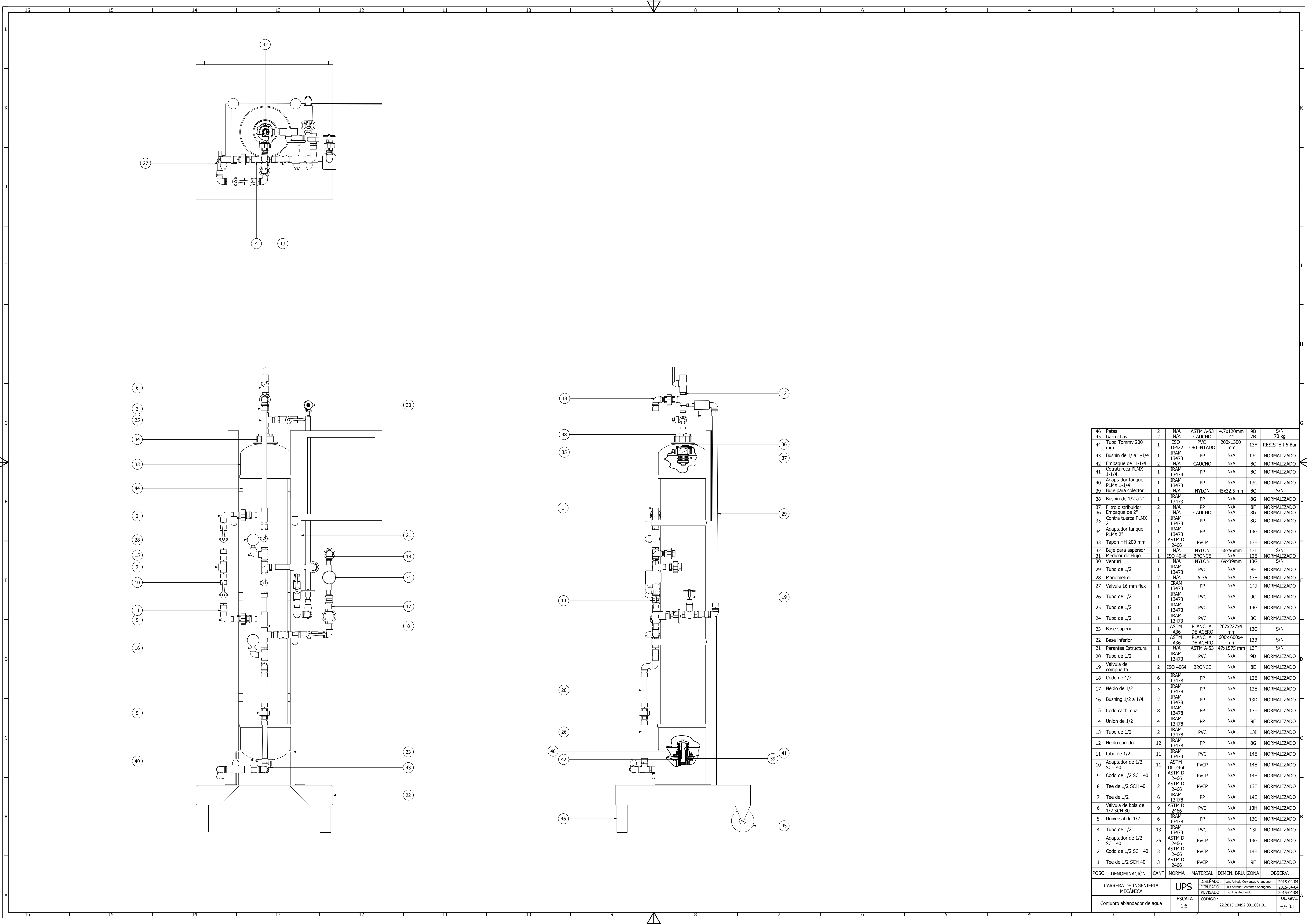


Montaje de Equipo en el laboratorio

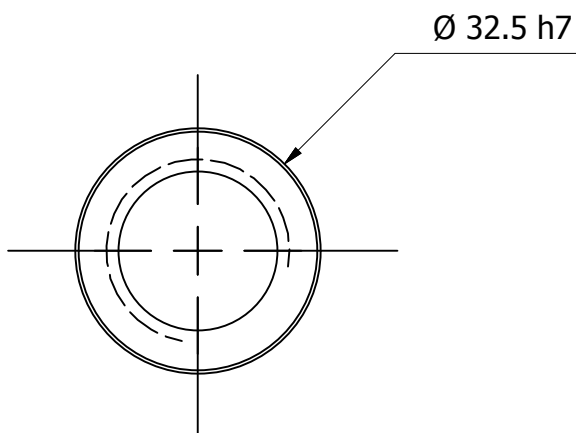
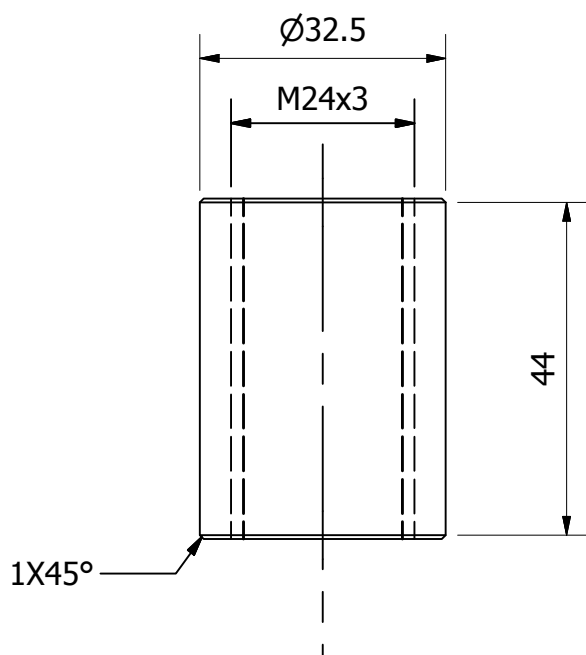


Montaje de Equipo

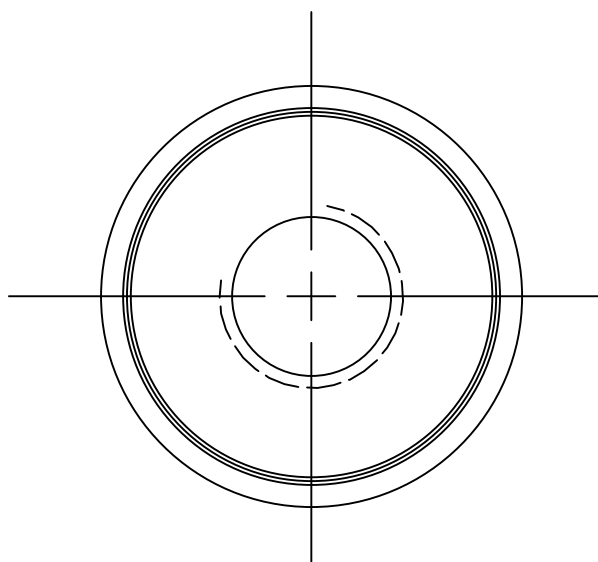
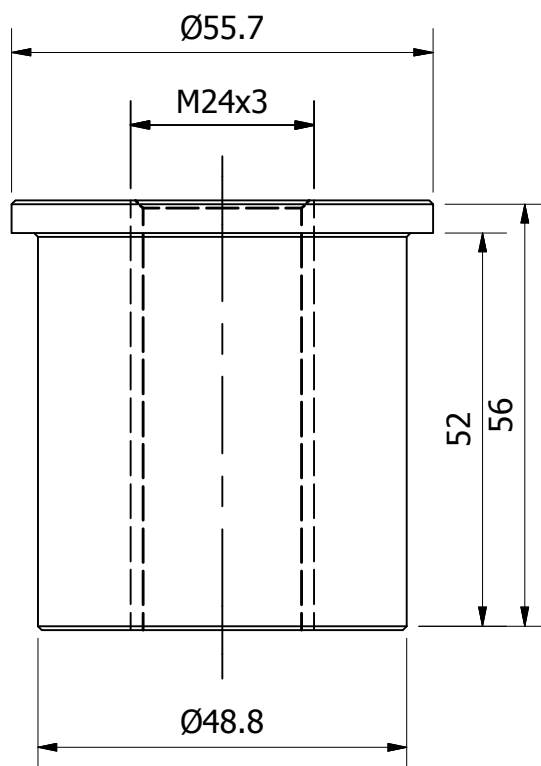
Anexo 6 PLANOS



| | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|------|-------------|-----------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|
| 46 | Patas | 2 | N/A | ASTM A-53 | 4.7x120mm | 9B | S/N |
| 45 | Garruchas | 2 | N/A | CAUCHO | 4" | 7B | 70 kg |
| 44 | Tubo Tommy 200 mm | 1 | ISO 16422 | PVC ORIENTADO | 200x1300 mm | 13F | RESISTE 1.6 Bar |
| 43 | Bushin de 1/ a 1-1/4 | 1 | IRAM 13473 | PP | N/A | 13C | NORMALIZADO |
| 42 | Empaque de 1-1/4 | 2 | N/A | CAUCHO | N/A | 8C | NORMALIZADO |
| 41 | Cotataureca PLMX 1-1/4 | 1 | IRAM 13473 | PP | N/A | 8C | NORMALIZADO |
| 40 | Adaptador tanque PLMX 1-1/4 | 1 | IRAM 13473 | PP | N/A | 13C | NORMALIZADO |
| 39 | Buje para colector | 1 | N/A | NYLON | 45x32.5 mm | 8C | S/N |
| 38 | Bushin de 1/2 a 2" | 1 | IRAM 13473 | PP | N/A | 8G | NORMALIZADO |
| 37 | Filtro distribuidor | 2 | N/A | PP | N/A | 8F | NORMALIZADO |
| 36 | Empaque de 2" | 2 | N/A | CAUCHO | N/A | 8G | NORMALIZADO |
| 35 | Contra tuerca PLMX 2" | 1 | IRAM 13473 | PP | N/A | 8G | NORMALIZADO |
| 34 | Adaptador tanque PLMX 2" | 1 | IRAM 13473 | PP | N/A | 13G | NORMALIZADO |
| 33 | Tapon HH 200 mm | 2 | ASTM D 2466 | PVCP | N/A | 13F | NORMALIZADO |
| 32 | Buje para aspersor | 1 | N/A | NYLON | 56x56mm | 13L | S/N |
| 31 | Medidor de Flujo Venturi | 1 | ISO 4046 | BRONCE | N/A | 12E | NORMALIZADO |
| 30 | | 1 | N/A | NYLON | 69x39mm | 13G | S/N |
| 29 | Tubo de 1/2 | 1 | IRAM 13473 | PVC | N/A | 8F | NORMALIZADO |
| 28 | Manometro | 2 | N/A | A-36 | N/A | 13F | NORMALIZADO |
| 27 | Válvula 16 mm flex | 1 | IRAM 13473 | PP | N/A | 14J | NORMALIZADO |
| 26 | Tubo de 1/2 | 1 | IRAM 13473 | PVC | N/A | 9C | NORMALIZADO |
| 25 | Tubo de 1/2 | 1 | IRAM 13473 | PVC | N/A | 13G | NORMALIZADO |
| 24 | Tubo de 1/2 | 1 | IRAM 13473 | PVC | N/A | 8C | NORMALIZADO |
| 23 | Base superior | 1 | ASTM A36 | PLANCH DE ACERO | 267x227x4 mm | 13C | S/N |
| 22 | Base inferior | 1 | ASTM A36 | PLANCH DE ACERO | 600x 600x4 mm | 13B | S/N |
| 21 | Parantes Estructura | 1 | N/A | ASTM A-53 | 47x1575 mm | 13F | S/N |
| 20 | Tubo de 1/2 | 1 | IRAM 13473 | PVC | N/A | 9D | NORMALIZADO |
| 19 | Válvula de compuerta | 2 | ISO 4064 | BRONCE | N/A | 8E | NORMALIZADO |
| 18 | Codo de 1/2 | 6 | IRAM 13478 | PP | N/A | 12E | NORMALIZADO |
| 17 | Neplo de 1/2 | 5 | IRAM 13478 | PP | N/A | 12E | NORMALIZADO |
| 16 | Bushing 1/2 a 1/4 | 2 | IRAM 13478 | PP | N/A | 13D | NORMALIZADO |
| 15 | Codo cachimba | 8 | IRAM 13478 | PP | N/A | 13E | NORMALIZADO |
| 14 | Union de 1/2 | 4 | IRAM 13478 | PP | N/A | 9E | NORMALIZADO |
| 13 | Tubo de 1/2 | 2 | IRAM 13478 | PVC | N/A | 13I | NORMALIZADO |
| 12 | Neplo carrido | 12 | IRAM 13478 | PP | N/A | 8G | NORMALIZADO |
| 11 | tubo de 1/2 | 11 | IRAM 13473 | PVC | N/A | 14E | NORMALIZADO |
| 10 | Adaptador de 1/2 SCH 40 | 11 | ASTM D 2466 | PVCP | N/A | 14E | NORMALIZADO |
| 9 | Codo de 1/2 SCH 40 | 1 | ASTM D 2466 | PVCP | N/A | 14E | NORMALIZADO |
| 8 | Tee de 1/2 SCH 40 | 2 | ASTM D 2466 | PVCP | N/A | 13E | NORMALIZADO |
| 7 | Tee de 1/2 | 6 | IRAM 13478 | PP | N/A | 14E | NORMALIZADO |
| 6 | Válvula de bola de 1/2 SCH 80 | 9 | ASTM D 2466 | PVC | N/A | 13H | NORMALIZADO |
| 5 | Universal de 1/2 | 6 | IRAM 13478 | PP | N/A | 13C | NORMALIZADO |
| 4 | Tubo de 1/2 | 13 | IRAM 13473 | PVC | N/A | 13I | NORMALIZADO |
| 3 | Adaptador de 1/2 SCH 40 | 25 | ASTM D 2466 | PVCP | N/A | 13G | NORMALIZADO |
| 2 | Codo de 1/2 SCH 40 | 3 | ASTM D 2466 | PVCP | N/A | 14F | NORMALIZADO |
| 1 | Tee de 1/2 SCH 40 | 3 | ASTM D 2466 | PVCP | N/A | 9F | NORMALIZADO |
| POSC | DENOMINACIÓN | CANT | NORMA | MATERIAL | DIMEN. BRU. | ZONA | OBSERV. |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | UPS | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangond | 2015-04-04 | |
| Conjunto ablandador de agua | | | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangond | 2015-04-04 | |
| | | | ESCALA 1:5 | REVISADO: | Ing. Luis Anandono | 2015-04-04 | |
| | | | | CÓDIGO : | 22.2015.10492.001.001.01 | TOL. GRAL +/- 0.1 | |

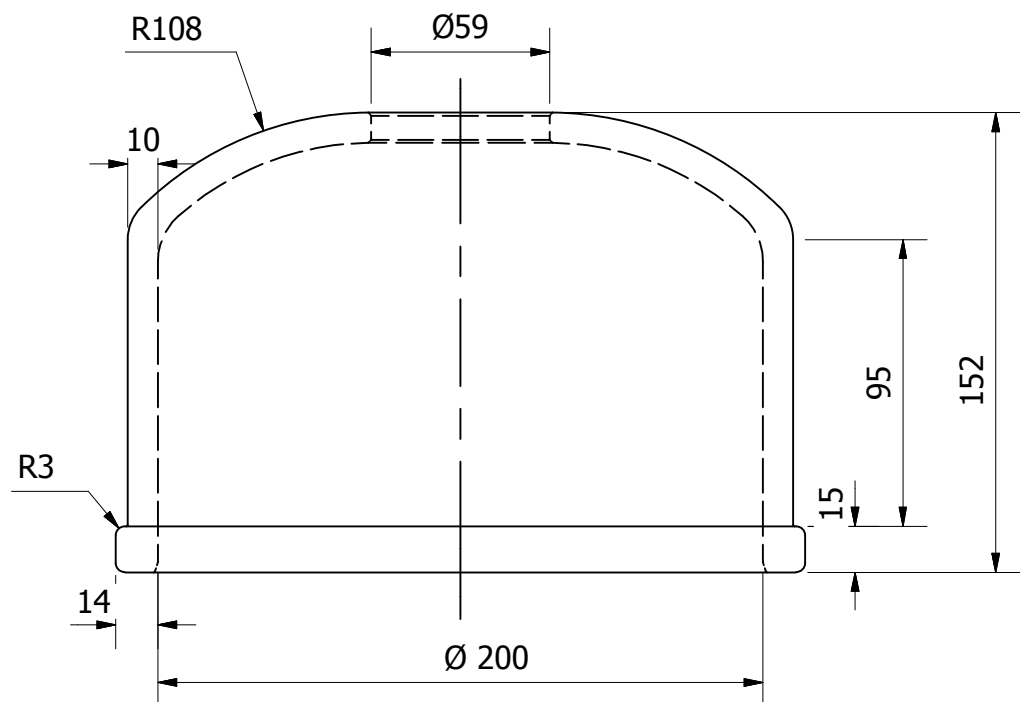
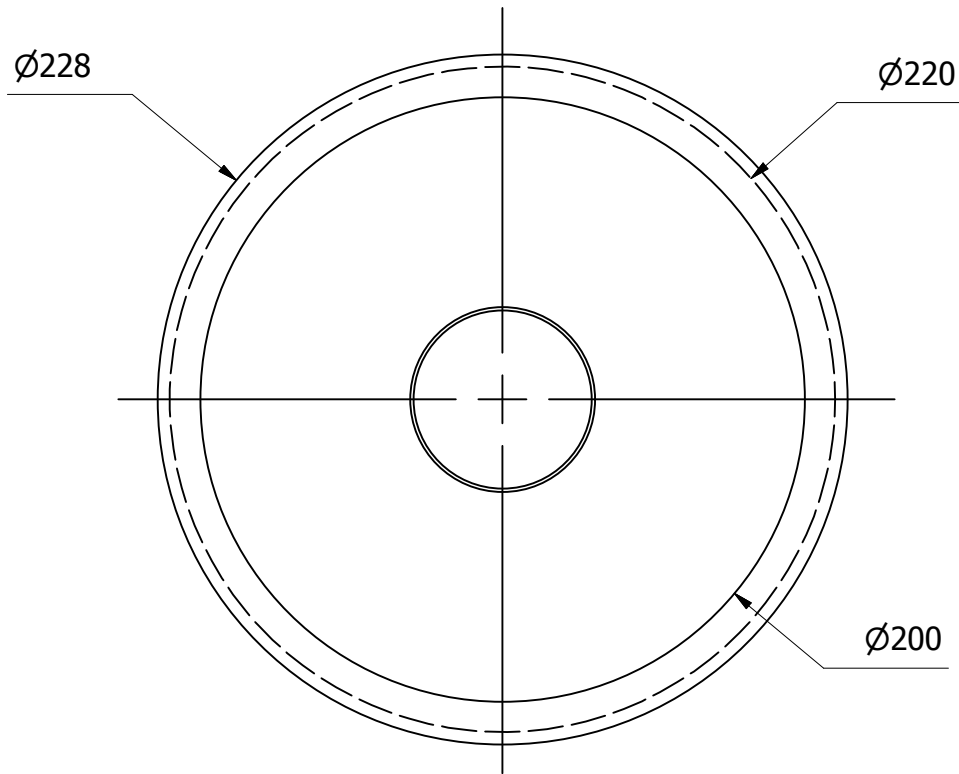


| | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------|
| Tratamiento Térmico | N/A | Material | Nylon | |
| Recubrimiento | N/A | Dimens. Brutas | Ø 35x50 | |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | UPS | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó | 2015-04-04 |
| | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó | 2015-04-04 |
| | | REVISADO: | Ing. Luis Andrango | 2015-04-04 |
| Buje centrador para colector | ESCALA 1:1 | CÓDIGO: 22.2015.10492.001.001.02 | TOL. GRAL. +/- 0.1 | |

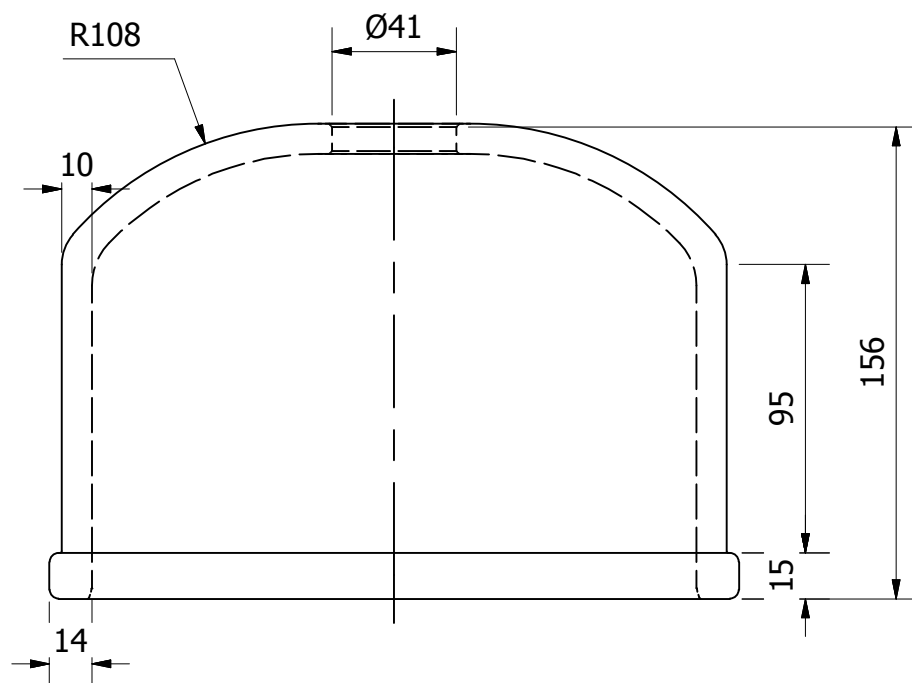
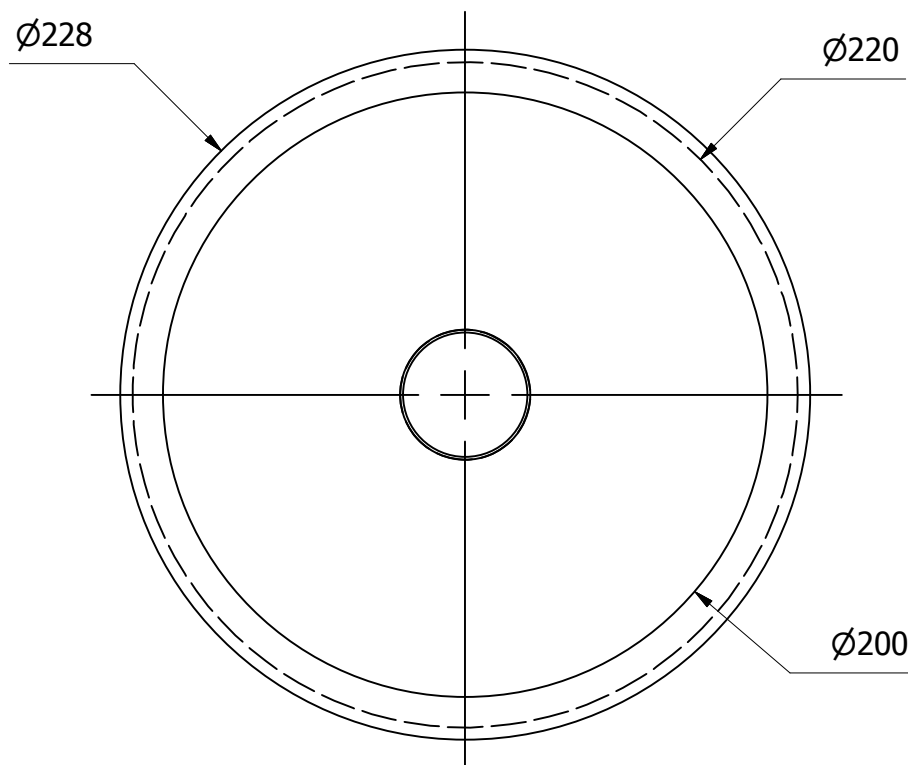


Chaflanes 1 X 45°

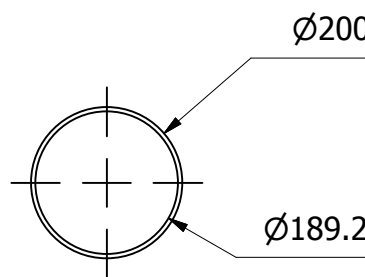
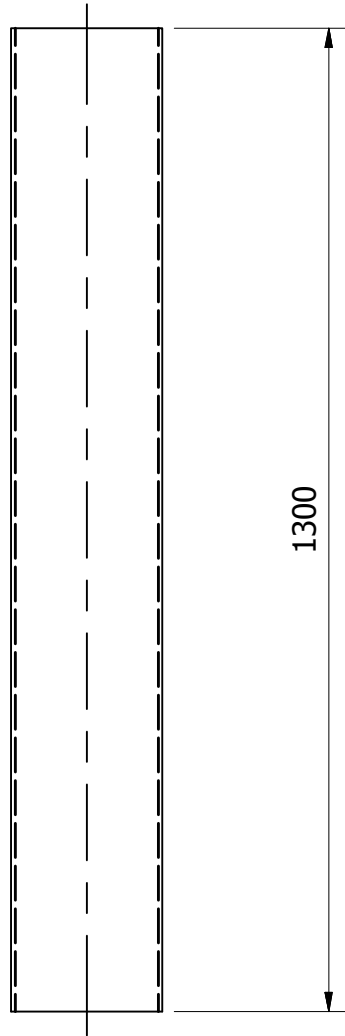
| | | | | |
|-----------------------------------|-----|----------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Tratamiento Térmico | N/A | Material | Nylon | |
| Recubrimiento | N/A | Dimens. Brutas | Ø 60x60 | |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó | 2015-04-04 |
| | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó | 2015-04-04 |
| | | REVISADO: | Ing. Luis Andrango | 2015-04-04 |
| Buje centrador para distribuidor | | ESCALA 1:1 | CÓDIGO: 22.2015.10492.001.001.03 | TOL. GRAL. +/- 0.1 |



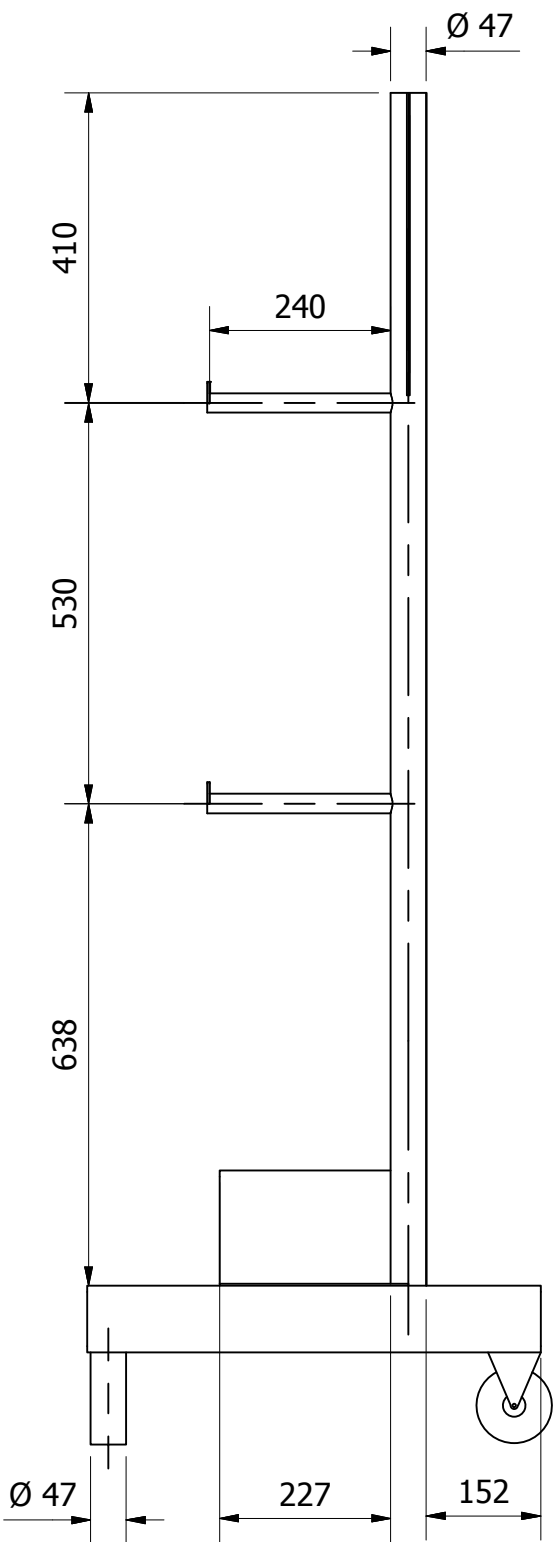
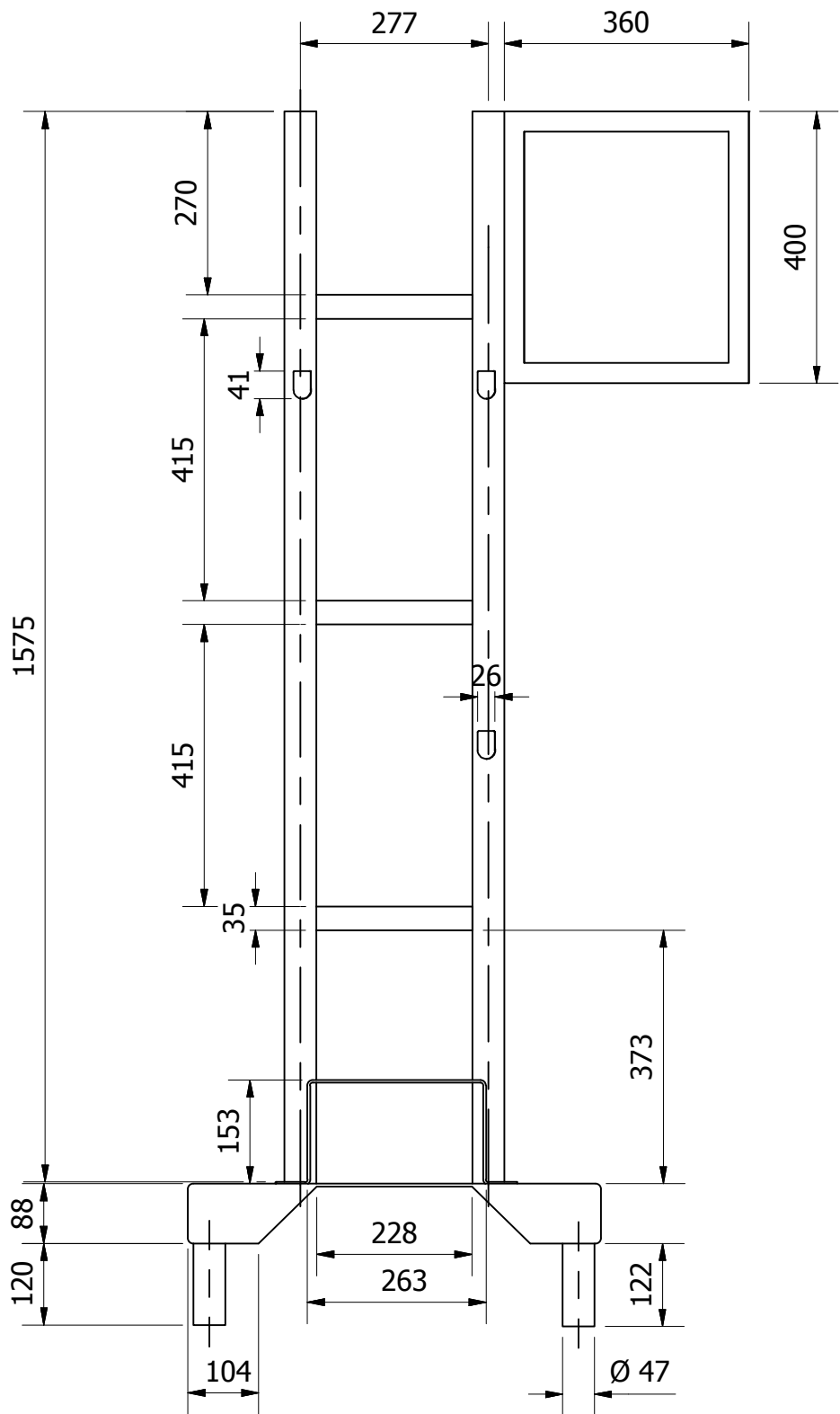
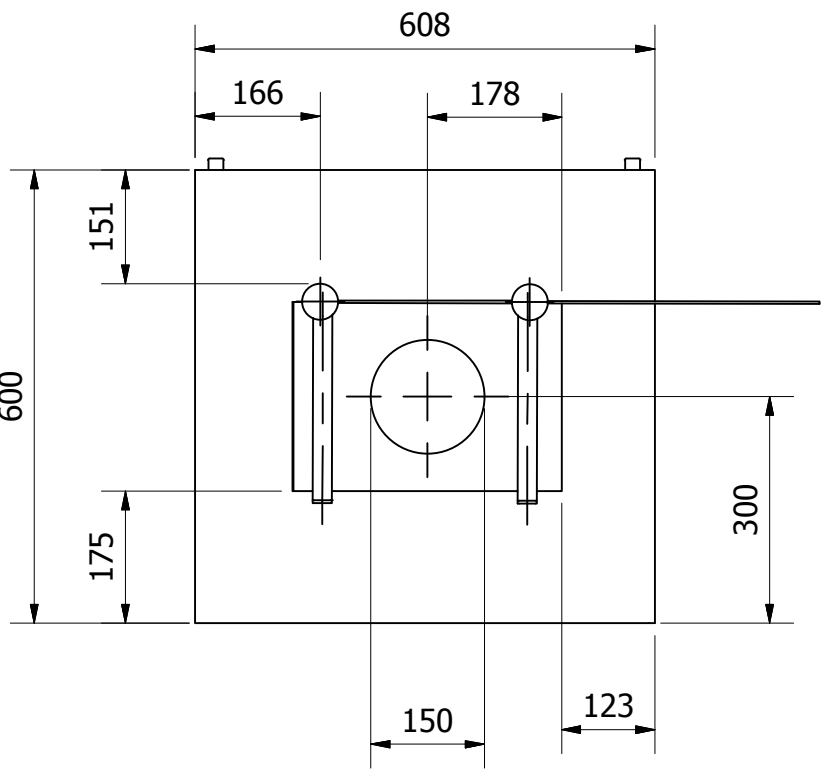
| | | | |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Tratamiento Térmico | N/A | Material | PVCP |
| Recubrimiento | N/A | Dimens. Brutas | Ø 220x152x10 |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | UPS | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó |
| | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó |
| | | REVISADO: | Ing. Luis Andrango |
| Tapón superior | ESCALA 1:2.5 | CÓDIGO: 22.2015.10492.001.001.04 | TOL. GRAL. +/- 0.1 |



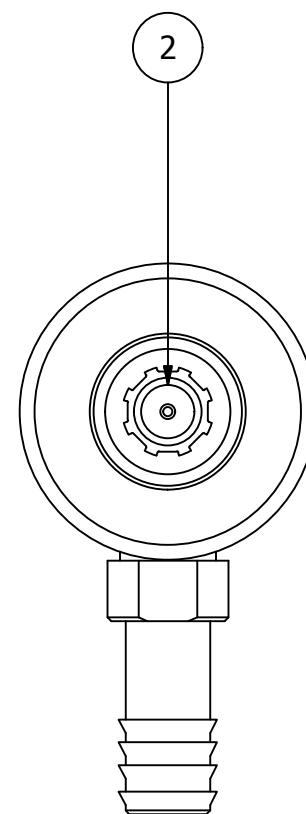
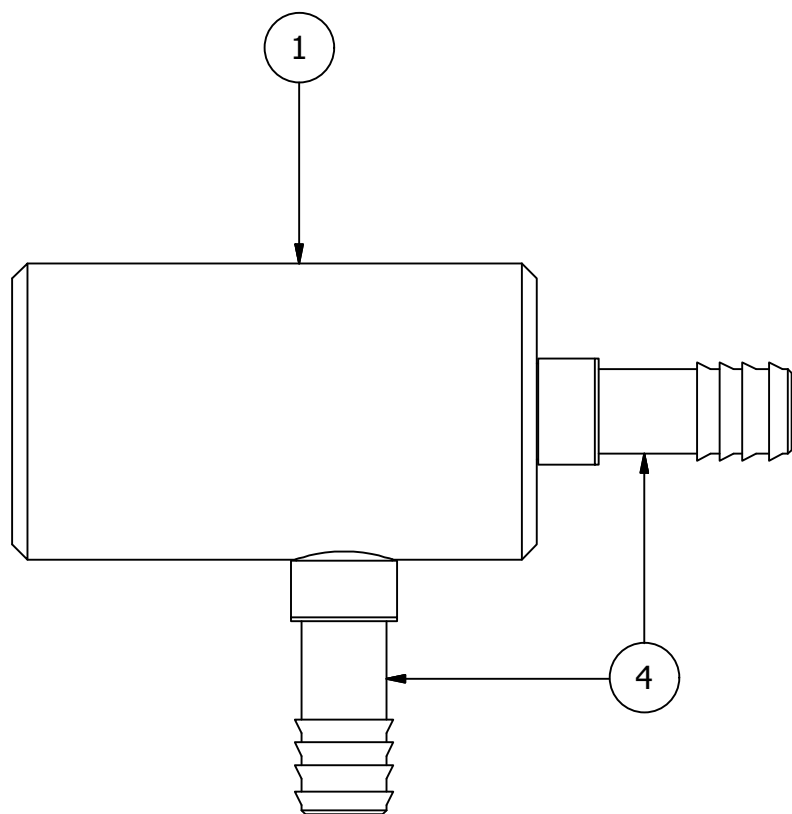
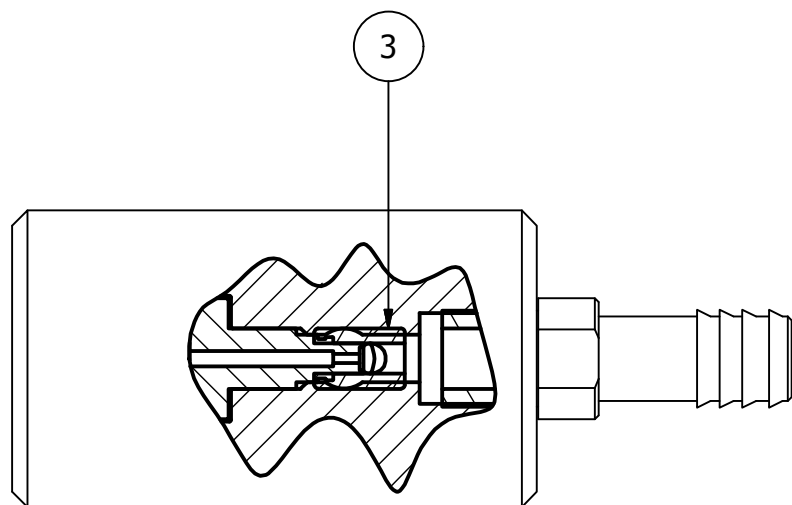
| | | | |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Tratamiento Térmico | N/A | Material | PVCP |
| Recubrimiento | N/A | Dimens. Brutas | Ø 220x156x10 |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | UPS | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangón |
| | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangón |
| | | REVISADO: | Ing. Luis Andrango |
| Tapón inferior | ESCALA 1:2.5 | CÓDIGO: 22.2014.10492.001.001.05 | TOL. GRAL. +/- 0.1 |



| | | | |
|-----------------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------------|
| Tratamiento Térmico | N/A | Material | PVC |
| Recubrimiento | N/A | Dimens. Brutas | Ø 200x1300 |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | UPS | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó |
| | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó |
| | | REVISADO: | Ing. Luis Andrango |
| Cilindro | ESCALA 1:10 | CÓDIGO: | TOL. GRAL. |
| | | 22.2015.10492.001.001.06 | +/- 0.1 |

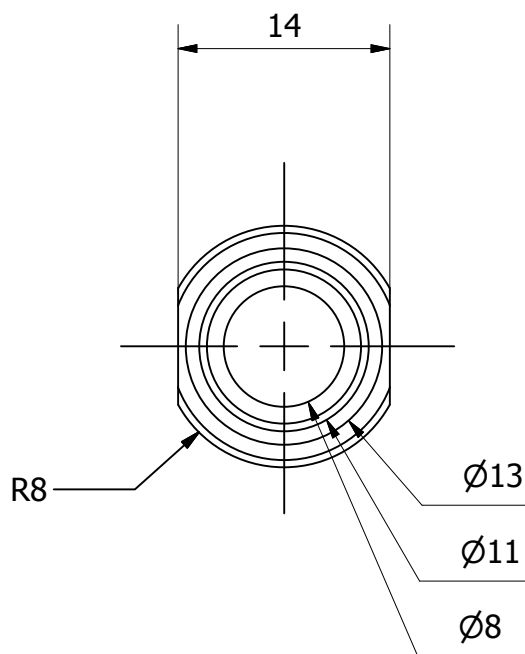
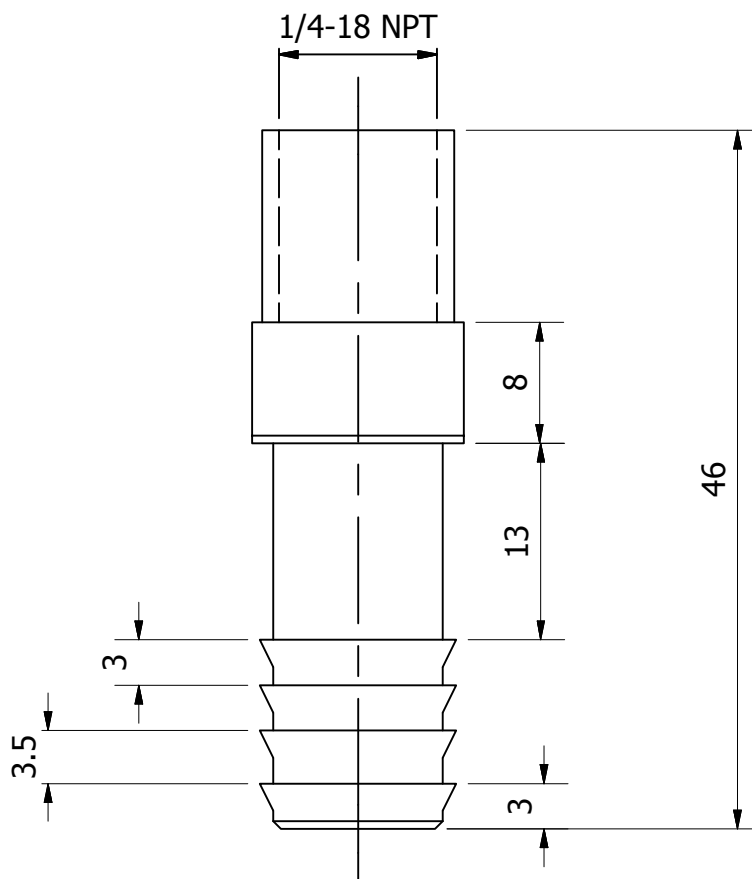


| | | | | |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------|------------|
| Tratamiento Térmico | N/A | Material | ASTM 36 | |
| Recubrimiento | Esmalte sintético | Dimens. Brutas | | |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | UPS | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangón | 2015-04-04 |
| | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangón | 2015-04-04 |
| | | REVISADO: | Ing. Luis Andrango | 2015-04-04 |
| Soporte | ESCALA 1:5 | CÓDIGO: | | TOL. GRAL. |
| | | 22.2015.10492.001.001.07 | | +/- 0.1 |

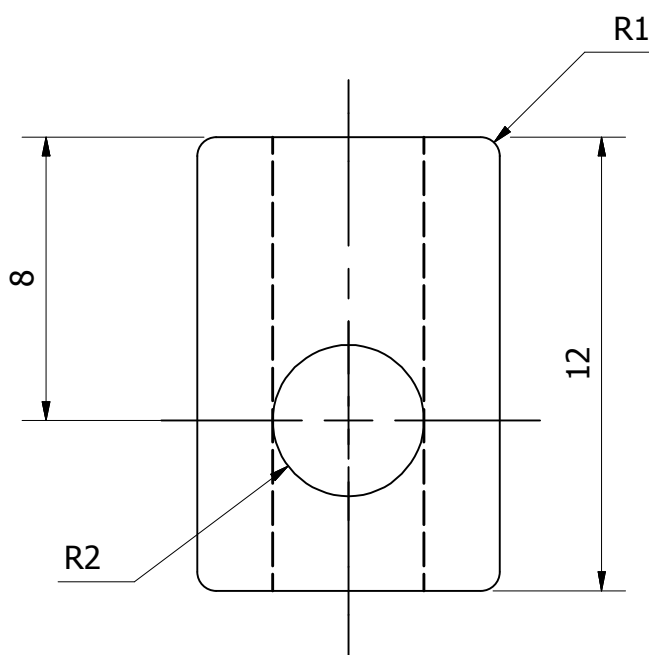
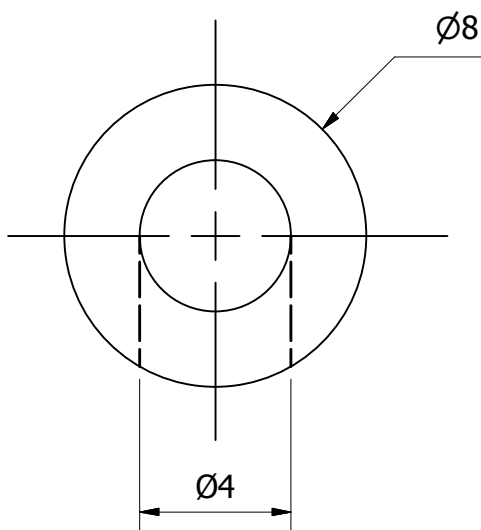


| | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|------|---------------|----------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 4 | Unión | 2 | N/A | Nylon | 46 X 14 mm | 5C | S/N |
| 3 | Buje reductor | 1 | N/A | Nylon | 12 X 8 mm | 5D | S/N |
| 2 | inyector | 1 | N/A | Plastico | N/A | 4C | S/N |
| 1 | Venturi | 1 | N/A | Nylon | 69 X 39 mm | 6C | S/N |
| POSC | DENOMINACIÓN | CANT | NORMA | MATERIAL | DIMEN. BRU. | ZONA | OBSERV. |
| Tratamiento Térmico | | N/A | | Material | | Nylon | |
| Recubrimiento | | N/A | | Dimens. Brutas | | | |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | UPS | | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó | 2015-04-04 |
| | | | | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó | 2015-04-04 |
| | | | | | REVISADO: | Ing. Luis Andrango | 2015-04-04 |
| Inyector venturi | | | ESCALA 1:1 | | CÓDIGO: 22.2015.10492.001.002.01 | | TOL. GRAL. +/- 0.1 |

| | | | |
|-----------------------------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Tratamiento Térmico | N/A | Material | Plástico |
| Recubrimiento | N/A | Dimens. Brutas | Ø 20x28 |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | UPS | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anagonó |
| | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anagonó |
| | | REVISADO: | Ing. Luis Andrango |
| Injector | ESCALA 2:1 | CÓDIGO: 22.2014.10492.001.002.03 | TOL. GRAL. +/- 0.1 |



| | | | |
|-----------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Tratamiento Térmico | N/A | Material | Nylon |
| Recubrimiento | N/A | Dimens. Brutas | Ø 20x60 |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | UPS | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangónó |
| | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangónó |
| | | REVISADO: | Ing. Luis Andrango |
| Unión | ESCALA 2:1 | CÓDIGO: 22.2015.10492.001.002.04 | TOL. GRAL. +/- 0.1 |



| | | | |
|-----------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Tratamiento Térmico | N/A | Material | Nylon |
| Recubrimiento | N/A | Dimens. Brutas | $\varnothing 15 \times 15$ |
| CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA | UPS | DISEÑADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó |
| | | DIBUJADO: | Luis Alfredo Cervantes Anangonó |
| | | REVISADO: | Ing. Luis Andrango |
| Buje reductor | ESCALA 5:1 | CÓDIGO: 22.2014.10492.001.002.05 | TOL. GRAL. +/- 0.1 |